

ความต้านทานการสึกหรอของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 440C
และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น AISI D2

นางสาวดารารัตน์ อาภาจิรสกุล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2556

**WEAR RESISTANCE OF AISI 440C MARTENSITIC
STAINLESS STEEL AND AISI D2 COLD WORK
TOOL STEEL**

Dararat Arparjirasakul



**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 2013**

ความต้านทานการลึกรของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 440C
และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น AISI D2

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.ฐาปนีย์ พัชรวีชญ์)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.อุษณีย์ กิตกำธร)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.รัตน์ บริสุทธิกุล)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปีจางค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ดรรชนี อาภาจิรสกุล : ความต้านทานการสึกหรอของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 440C และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น AISI D2 (WEAR RESISTANCE OF AISI 440C MARTENSITIC STAINLESS STEEL AND AISI D2 COLD WORK TOOL STEEL)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษณีย์ กิตกัชร, 81 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอัตราการสึกหรอของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดมาร์เทนซิติก AISI 440C และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น AISI D2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับอัตราการสึกหรอ และความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคกับอัตราการสึกหรอของเหล็กกล้าทั้งสองชนิดภายหลังการชุบแข็งและการอบคืนไฟ การวิจัยเริ่มจากการขึ้นรูปเหล็กกล้าทั้งสองชนิดเป็นแผ่นจานและหมุด โดยแผ่นจานมีลักษณะเป็นแผ่นกลมที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ส่วนหมุดมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกที่มีความยาว 20 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติกและเหล็กกล้าเครื่องมือเย็นถูกนำไปชุบแข็งด้วยการอบที่อุณหภูมิ 1050 และ 1020 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตามด้วยการเย็นตัวในอากาศ แล้วบำบัดเย็นด้วยไนโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส ในส่วนของแผ่นจานถูกนำไปอบคืนไฟที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ส่วนหมุดนำไปอบคืนไฟที่อุณหภูมิ 150 300 450 และ 600 องศาเซลเซียส จากนั้นนำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและค่าความแข็งเตรียมผิวชิ้นงานสำหรับทดสอบการสึกหรอให้มีความหยาบผิวประมาณ 0.8 ไมครอน ทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่องทดสอบพินออนดิस्क โดยทดสอบที่แรงกด 10 และ 50 นิวตัน ระยะทาง 200-1,000 เมตร ตรวจสอบน้ำหนักที่สูญเสียบนจากการทดสอบการสึกหรอ ตรวจสอบผิวชิ้นงานภายหลังการทดสอบการสึกหรอด้วยกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงแบบสเตอริโอ และหาอัตราการสึกหรอจากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียบนกับระยะทางที่ทดสอบ ผลการศึกษาพบว่า โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติกและเหล็กกล้าเครื่องมือเย็นภายหลังจากการชุบแข็งและอบคืนไฟประกอบไปด้วยเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ คาร์ไบด์ปฐมภูมิและคาร์ไบด์ทุติยภูมิ ซึ่งปริมาณของคาร์ไบด์ทุติยภูมิเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการอบคืนไฟที่เพิ่มขึ้น ผลการทดสอบค่าความแข็งที่ได้ภายหลังจากการอบคืนไฟพบว่าค่าความแข็งที่ได้มีค่าลดลงตามอุณหภูมิในการอบคืนไฟที่สูงขึ้น จากการทดสอบการสึกหรอพบว่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบมีค่าลดลงตามอุณหภูมิอบคืนไฟของหมุดที่เพิ่มขึ้น และคู่การทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติกมีอัตราการสึกหรอสูงกว่าคู่ทดสอบเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น เมื่อพิจารณาปริมาตรที่สูญเสียบนพบว่าคู่ทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติกที่หมุดผ่านการอบคืนไฟที่ 600 องศาเซลเซียส มีปริมาตรการสูญเสียมากที่สุด และคู่ทดสอบเหล็กกล้าเครื่องมือเย็นที่หมุดผ่านการการอบคืนไฟที่ 150 องศา

เซลเซียส มีปริมาณการสูญเสียไปต่ำที่สุด อัตราการสึกหรอของหมุดและแผ่นงานเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความแข็งของหมุดลดลง พื้นผิวการสึกหรอที่พบหลังจากการทดสอบแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าที่แรงกด 10 นิวตัน หมุดเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติกที่ผ่านการอบคืนไฟที่ 150 องศาเซลเซียส เกิดการสึกหรอแบบยึดติด และหมุดที่ผ่านการอบคืนไฟที่ 300 และ 450 องศาเซลเซียส เกิดการสึกหรอแบบยึดติดและแบบขูดขีด ส่วนหมุดที่ผ่านการอบคืนไฟที่ 600 องศาเซลเซียส เกิดการสึกหรอแบบขูดขีด ส่วนหมุดเหล็กกล้าเครื่องมือเย็นทั้งหมด พบการสึกหรอแบบยึดติด โดยพื้นผิวการสึกหรอปรากฏการเชื่อมติดกันของวัตถุเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการอบคืนไฟ และเมื่อทดสอบที่แรงกด 50 นิวตัน ทั้งในกรณีหมุดเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก และหมุดเหล็กกล้าเครื่องมือเย็นพบว่าลักษณะพื้นผิวเป็นการสึกหรอแบบขูดขีดในทุกๆชิ้นงาน โดยความรุนแรงในการสึกหรอค่อยๆเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการอบคืนไฟที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาถึงขนาดอนุภาคของการสึกหรอเห็นได้ชัดเจนว่าเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติกมีขนาดอนุภาคจากการสึกหรอใหญ่กว่าเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น



สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

DARARAT ARPANJIRASAKUL : WEAR RESISTANCE OF AISI 440C
MARTENSITIC STAINLESS STEEL AND AISI D2 COLD WORK TOOL
STEEL. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. USANEE KITKAMTHORN,
Ph.D., 81 PP.

WEAR/COLD WORK TOOL STEEL/MARTENSITIC STAINLESS STEEL

This research studied 1) wear rates of the cold work tool steel AISI D2 and martensitic stainless steel AISI 440C, 2) relationship between wear rates and hardness values, and 3) relationship between wear rates and microstructures of the quenched and tempered steels. Disc and pin samples of both steels were machined. The thickness and diameter of discs were 5 mm, and 25 mm, respectively where as those of pins were 20 mm, and 5 mm, respectively. All AISI 440C and D2 samples were austenitized for an hour at 1050°C, and 1020°C, respectively. The samples were then cooled in air and sub-zero treated with liquid nitrogen at -196°C. All discs were further tempered at 600°C. Pins were tempered at 150, 300, 450, and 600°C. The treated pins and discs were ground and the surface roughness was controlled at 0.8 µm. Wear tests were carried out using pin-on-disc wear testing apparatus. Test loads were 10 and 50 N. Testing distances were 200-1,000 m. Weight losses were determined. Worn surfaces were investigated by stereoscopic microscope. Wear rates were obtained from the plots of wear volumes versus sliding distances in each test condition. Microstructure and hardness were also studied. The results showed that microstructure of AISI 440C and D2 after quenching and tempering consisted of tempered martensite, primary carbides, and secondary carbides. Volume and number

of secondary carbides increased with an increase of tempering temperature. Therefore, hardness decreased with tempering temperature. Friction forces occurred during pin-on-disc tests were recorded. It was found that friction forces decreased with an increase of pin tempering temperature. Wear rates of AISI 440C were higher than those of AISI D2. The highest volume loss was found in the test using AISI 440C pin tempered at 600°C. The lowest volume loss was found in the test using AISI D2 pin tempered at 150°C. Wear rate of pin and disc increased when the hardness of pin decreased. Worn surface of AISI 440C after wear testing at 10 N loading showed adhesive wear in pin tempered at 150°C, mixed of adhesive and abrasive wears in pin tempered at 300 and 450°C, and abrasive wear in pin tempered at 600°C. In case of AISI D2, all samples showed adhesive wear. After wear testing using 50 N loading, all pins of AISI 440C and D2 revealed abrasive wear. Severe wear occurred in pin tempered at high temperature and wear debris of AISI 440C were larger than those of D2.

School of Metallurgical Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคล ต่างๆ เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งทางด้านวิชาการและทางด้านการดำเนินงานวิจัย

ศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้านส่วนประกอบฮาร์ดแวร์คอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ให้ทุนวิจัยเพื่อการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษณีย์ กิตติอักษร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และกรรมการ ผู้ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ ดร.ฐาปณีย์ พัชรวิษณุ อาจารย์ ดร.รัตน บริสุทธิกุล และคณาจารย์ประจำสาขา วิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำแนะนำปรึกษาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมา โดยตลอด

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) บริษัท ไทยโตเคน เทอร์โม จำกัด คณะ วิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน และ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทางกล เครื่อง ทดสอบการสึกหรอและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมืองานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

เจ้าหน้าที่สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ เจ้าหน้าที่สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ เจ้าหน้าที่ เครื่องมือและเทคโนโลยี (อาคารเครื่องมือ 1 6 และ 10) ที่อำนวยความสะดวกและให้คำแนะนำงาน วิจัยและวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณที่ ๆ และน้อง ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือไม่ว่าจะเป็นขั้นตอนกลึงชิ้นงาน การ เตรียมชิ้นงานทดสอบ และการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือขั้นสูง

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่บิดา มารดา และผู้ มีพระคุณ ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ส่งเสริมการศึกษาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัย มาโดยตลอด

ดาร์รัตน์ อาภาจิรสกุล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฌ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ผลที่ได้รับจากงานวิจัย	3
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 บทนำ	4
2.2 กระบวนการอบชุบทางความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 440C	4
2.3 กระบวนการอบชุบทางความร้อนของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2	7
2.4 ชนิดของบรรยากาศที่ใช้ในการอบชุบ	11
2.5 กลไกการสึกหรอ	11
2.6 เครื่องมือทดสอบการสึกหรอ	18
2.7 ความต้านทานการสึกหรอ	19
2.8 พื้นผิวการสึกหรอและเศษการสึกหรอ	22
3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	26
3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	27
3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	28
3.2 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย.....	31
4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	39
4.1 บทนำ.....	39
4.2 โครงสร้างจุลภาคหลังการอบคั้นไฟ.....	39
4.3 ผลค่าความแข็ง.....	43
4.4 แรงเสียดทานกับระยะทางที่ทดสอบ.....	45
4.4.1 แรงเสียดทานในกรณีการทดสอบด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 440C.....	45
4.4.2 แรงเสียดทานในกรณีทดสอบด้วยเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2.....	47
4.5 ปริมาตรที่สูญหายไป volume loss.....	49
4.6 อัตราการสึกหรอของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 440C และเหล็กกล้า เครื่องมือเย็น D2.....	54
4.7 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ.....	58
4.8 พื้นผิวการสึกหรอและเศษการสึกหรอ.....	60
4.8.1 เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 440C.....	60
4.8.2 เหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2.....	61
5 บทสรุป.....	70
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	70
5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป.....	71
รายการอ้างอิง.....	72
ภาคผนวก.....	74
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	74
ประวัติผู้เขียน.....	81

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	อุณหภูมิในการอบคืนไฟของเหล็กกล้าทั้งสองประเภท.....	2
2.1	หมวดและชนิดของการสึกหรอในโลหะ.....	13
2.2	สมบัติทางกายภาพและทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม MIM 316L และ wrought 316L.....	23
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น.....	27
3.2	ค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น ก่อนอบชุบทางความร้อน.....	27
3.3	สภาวะในการอบคืนไฟของหมุดที่ใช้ในการทดสอบและการกำหนดชื่อเรียกตัวอย่าง.....	36
4.1	ค่าความแข็งเฉลี่ยของเหล็กกล้าทั้งสองประเภทภายหลังการชุบแข็งและอบคืนไฟ.....	44
4.2	ค่าแรงเสียดทานของเหล็กกล้าทั้งสองประเภทที่ได้จากการทดสอบ.....	49
4.3	อัตราการสึกหรอของเหล็กกล้าทั้งสองชนิดภายหลังจากการทดสอบการสึกหรอ.....	57
4.4	อุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในระหว่างทดสอบ Pin on disc ที่ระยะทางต่างๆ แรงกด 10 นิวตัน.....	60

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค 440C ภายหลังจากชุบแข็งและอบคืนไฟ ที่อุณหภูมิ 1000-1050 องศาเซลเซียส..... 6
2.2	การอบคลายความเครียด, การชุบแข็ง และการอบคืนตัวเหล็กกล้า AISI D2..... 9
2.3	ค่าความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ภายหลังจากชุบแข็งและอบคืนไฟ ที่อุณหภูมิ 1000-1050 องศาเซลเซียส..... 9
2.4	โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 หลังชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1020 องศาเซลเซียส (ก) เย็นตัวในอากาศ (ข) อบคืนไฟ 1 ครั้ง (ค) อบคืนไฟ 2 ครั้ง..... 10
2.5	การสึกหรอแบบต่างๆ (ก) การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive) (ข) การสึกหรอแบบขูดขีด (Abrasive) (ค) การสึกหรอแบบล้าตัว (Fatigue Wear)..... 12
2.6	พื้นผิวของวัสดุที่มองเห็นด้วยตาเปล่าว่าเรียบ แต่จะมีความขรุขระในระดับจุลภาคเสมอ เมื่อสัมผัสกันจึงเกิดเป็นจุดสัมผัส (ในวงกลม) ขึ้น ณ ยอดสูงบนผิวนั้น เมื่อมีพันธะแบบ ยึดติดเกิดขึ้น การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างผิวหน้าจะทำให้เกิดการแตกหักของ ยอดสูงได้..... 16
2.7	ผลกระทบจากลักษณะโครงสร้างของกลุ่มสัมผัสกับการสึกหรอ..... 17
2.8	เครื่องทดสอบแบบพินออนดิสก์ (Pin-on-disc)..... 19
2.9	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชิ้นงานกับเวลาในการถูของแผ่นจานอะลูมิเนียม 6061 ที่ไถลกับหมุดที่ทำจากเหล็กกล้าแม่พิมพ์ทดสอบที่ความเร็ว 1 m/s และ 2.2 MPa..... 20
2.10	การเปรียบเทียบลักษณะการสึกหรอระหว่างผิวหน้าที่ถูของหมุดที่ลักษณะต่างกัน โดยหมุดทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนสูง (Hv=210) และแผ่นจานทำจากเหล็กกล้า คาร์บอนปานกลาง (Hv=160) ที่ 4 m/s และ 5.5 MPa (ก) หมุดอยู่นิ่งกับที่ (ข) หมุดหมุน..... 21
2.11	เปรียบเทียบอัตราการสึกหรอระหว่างวัสดุคู่สัมผัสชนิดเดียวกันของเหล็กกล้าคาร์บอน ปานกลางที่ความเร็วในการไถลคงที่ 2 m/s..... 21

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.12	ภาพถ่ายอิเล็กทรอนิกส์ของพื้นผิวการสึกหรอของชิ้นทดสอบแบบหมุน MIM 316L (ความพรุน 2%) ที่ระยะไกล 2 กิโลเมตรและความเร็วการไกล (ก) 0.2 เมตรต่อวินาที และ (ข) 2.0 เมตรต่อวินาที.....	23
2.13	ภาพถ่ายอิเล็กทรอนิกส์ของเศษการสึกหรอของชิ้นทดสอบแบบหมุน MIM 316L (ความพรุน 2%) ที่ระยะไกล 2 กิโลเมตร และความเร็วการไกล (ก) 0.2 เมตรต่อวินาที และ (ข) 2.0 เมตรต่อวินาที.....	24
3.1	แผนภาพระเบียบวิธีการทำวิจัย.....	26
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	29
3.3	ชิ้นงานที่ตัดขึ้นรูป (ก) หมุด (Pin) และ (ข) แผ่นจาน (Disc).....	32
3.4	การชุบแข็งเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 440C (ก) ขึ้นรูปแผ่นจาน (disc) และ (ข) ขึ้นรูปหมุด (pin).....	33
3.5	การชุบแข็งเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 (ก) ขึ้นรูปแผ่นจาน (disc) และ (ข) ขึ้นรูปหมุด (pin).....	35
3.6	วิธีการวัดอุณหภูมิในขณะที่ทดสอบการสึกหรอ.....	37
4.1	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค 440C ในสภาพปกติ (ก) โครงสร้างจุลภาคของแผ่นจาน (ข) โครงสร้างจุลภาคของหมุด (F คือเฟอร์ไรต์ และ C คือคาร์ไบด์).....	40
4.2	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ในสภาพปกติ (ก) โครงสร้างจุลภาคของแผ่นจาน (ข) โครงสร้างจุลภาคของหมุด (F คือเฟอร์ไรต์ และ C คือคาร์ไบด์).....	40
4.3	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค 440C ที่กลึงใสเป็นหมุด ภายหลังจากอบคืนไฟ 150 300 450 และ 600 องศาเซลเซียส (M คือ มาร์เทนไซต์, PC คือ คาร์ไบด์ปฐมภูมิ และ SC คือ คาร์ไบด์ทุติยภูมิ).....	41
4.4	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ที่กลึงใสเป็นหมุด ภายหลังจากอบคืนไฟ 150 300 450 และ 600 องศาเซลเซียส (M คือ มาร์เทนไซต์, PC คือ คาร์ไบด์ปฐมภูมิ และ SC คือ คาร์ไบด์ทุติยภูมิ).....	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.5	ค่าความแข็งเทียบกับอุณหภูมิในการอบคืนไฟของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 440C และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ของหมุด.....	44
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับระยะทางที่ทดสอบ ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 440C ที่แรงกด 10 นิวตัน.....	46
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับระยะทางที่ทดสอบ ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 440C ที่แรงกด 50 นิวตัน.....	46
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับระยะทางที่ทดสอบชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ที่แรงกด 10 นิวตัน.....	48
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับระยะทางที่ทดสอบชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ที่แรงกด 50 นิวตัน.....	48
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรการสึกหรอกับระยะทางที่ใช้ในการทดสอบ ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 440C และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ชิ้นงานจานที่แรงกด 10 นิวตัน.....	50
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรการสึกหรอกับเวลาระยะที่ใช้ในการทดสอบ ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 440C และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ชิ้นงานหมุดที่แรงกด 10 นิวตัน (ก)รวมทุกชิ้นงาน (ข)ขยายรูป(ก)โดยกำหนดช่วงปริมาตรสูญเสียดูแลย์ 0-0.45 mm ³	51
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรการสึกหรอกับเวลาระยะที่ใช้ในการทดสอบ ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 440C และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ชิ้นงานจานที่แรงกด 50 นิวตัน.....	52
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรการสึกหรอกับเวลาระยะที่ใช้ในการทดสอบ ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 440C และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ชิ้นงานหมุดที่แรงกด 50 นิวตัน (ก)รวมทุกชิ้นงาน (ข)ขยายรูป(ก)โดยกำหนดช่วงปริมาตรสูญเสียดูแลย์ 0-8 mm ³	53
4.14	อัตราการสึกหรอของหมุดและงานของคู่การทดสอบต่างๆของเหล็กกล้าไร้สนิม มาร์เทนซิติก 440C ที่แรงกด 10 นิวตัน.....	55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.15	อัตราการสึกหรอของหมุดและงานของกลุ่มการทดสอบต่างๆของเหล็กกล้าไร้สนิม มาร์เทนซิติก 440C ที่แรงกด 50 นิวตัน.....	55
4.16	อัตราการสึกหรอของหมุดและงานของกลุ่มการทดสอบต่างๆของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ที่แรงกด 10 นิวตัน.....	56
4.17	อัตราการสึกหรอของหมุดและงานของกลุ่มการทดสอบต่างๆของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ที่แรงกด 50 นิวตัน.....	56
4.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบการสึกหรอกับระยะทางที่ใช้ในการทดสอบของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 440C.....	59
4.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบการสึกหรอกับระยะทางที่ใช้ในการทดสอบของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2.....	59
4.20	พื้นผิวการสึกหรอภายหลังการทดสอบการสึกหรอของหมุดชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม มาร์เทนซิติก 440C ภายใต้อบคั้นไฟ 150 องศาเซลเซียส (ก) 300 องศาเซลเซียส (ข) 450 องศาเซลเซียส (ค) 600 องศาเซลเซียส.....	62
4.21	พื้นผิวการสึกหรอภายหลังการทดสอบการสึกหรอของหมุดชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม มาร์เทนซิติก 440C ภายใต้อบคั้นไฟ 150 องศาเซลเซียส (ก) 300 องศาเซลเซียส (ข) 450 องศาเซลเซียส (ค) 600 องศาเซลเซียส.....	63
4.22	พื้นผิวการสึกหรอภายหลังการทดสอบการสึกหรอของหมุดชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ภายใต้อบคั้นไฟ 150 องศาเซลเซียส (ก) 300 องศาเซลเซียส (ข) 450 องศาเซลเซียส (ค) 600 องศาเซลเซียส.....	64
4.23	พื้นผิวการสึกหรอภายหลังการทดสอบการสึกหรอของหมุดชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ภายใต้อบคั้นไฟ 50 นิวตัน (ก) 300 องศาเซลเซียส (ข) 450 องศาเซลเซียส (ค) 600 องศาเซลเซียส.....	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24	
<p>เศษสึกหรือภายหลังการทดสอบการสึกหรือชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค 440C ภายใต้แรงกด 10 นิวตัน (ก) อบคีนไฟ 150 องศาเซลเซียส (ข) อบคีนไฟ 300 องศาเซลเซียส (ค) อบคีนไฟ 450 องศาเซลเซียส (ง) อบคีนไฟ 600 องศาเซลเซียส.....66</p>	
4.25	
<p>เศษการสึกหรือภายหลังการทดสอบการสึกหรือชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม มาร์เทนซิติค 440C ภายใต้แรงกด 50 นิวตัน (ก) อบคีนไฟ 150 องศาเซลเซียส (ข) อบคีนไฟ 300 องศาเซลเซียส (ค) อบคีนไฟ 450 องศาเซลเซียส (ง) อบคีนไฟ 600 องศาเซลเซียส.....67</p>	
4.26	
<p>เศษการสึกหรือภายหลังการทดสอบการสึกหรือเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ภายใต้แรงกด 10 นิวตัน (ก) อบคีนไฟ 150 องศาเซลเซียส (ข) อบคีนไฟ 300 องศาเซลเซียส (ค) อบคีนไฟ 450 องศาเซลเซียส (ง) อบคีนไฟ 600 องศาเซลเซียส.....68</p>	
4.27	
<p>เศษการสึกหรือภายหลังการทดสอบการสึกหรือเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ภายใต้แรงกด 50 นิวตัน (ก) อบคีนไฟ 150 องศาเซลเซียส (ข) อบคีนไฟ 300 องศาเซลเซียส (ค) อบคีนไฟ 450 องศาเซลเซียส (ง) อบคีนไฟ 600 องศาเซลเซียส.....69</p>	

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 440C มีคาร์บอนอยู่ในช่วง 0.6-1.20% และมีโครเมียมอยู่ในเกณฑ์สูงถึง 16.0-18.0% และด้วยปริมาณโครเมียมสูงจึงส่งผลให้มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนดี สามารถชุบแข็งให้ได้ค่าความแข็งที่สูงที่สุดในกลุ่มของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติกด้วยกัน จึงมีความต้านทานต่อการเสียดสีสูงสุด โดยเฉพาะเมื่อผ่านการชุบแข็งและอบคืนไฟแล้ว โดยปกติมักถูกนำไปใช้งานหลากหลาย เช่น แม่พิมพ์พลาสติกที่ต้องทนต่อความเค้นสูงๆและทนต่อการสึกหรอและไม่เป็นสนิม แม่พิมพ์ปั๊ม ลูกปืนและดัลบลูกปืน (Bearing) ชิ้นส่วนต่างๆของวาล์วและปั๊ม หัวฉีดและหัวพ่น (Nozzles) ในงานต่างๆ รวมไปถึงอุปกรณ์จับยึดและอุปกรณ์สำหรับการขึ้นรูปชิ้นส่วนสำหรับการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

เหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 นิยมใช้ทำแม่พิมพ์สำหรับงานเย็นอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีความต้านทานต่อการเสียดสีดีมาก เหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 มีคาร์บอนและโครเมียมในปริมาณสูง นอกจากนี้ยังมีการผสมธาตุโมลิบดีนัมและวานาเดียมให้สูงถึง 1% เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งให้มีความแกร่งดี และช่วยรักษาคมตัดให้มีความแข็งแรงและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ช่วยให้ทนต่อการเสียดสีและต้านทานต่อการสึกหรอได้สูงมากขึ้น นิยมใช้ทำแม่พิมพ์สำหรับงานปั๊ม (Pressing) ,งานดัด (Bending) , งานอัดขึ้นรูปเย็น (Cold extrusion) , ลูกกรีด , ใบมีดตัดโลหะและงานที่ต้องทนกับการเสียดสีสูงๆ เหล็กกล้าทั้งสองประเภทนี้มีสมบัติที่ใกล้เคียงกันในด้านความต้านทานต่อการเสียดสี และสามารถนำไปใช้งานที่สภาวะทนต่อความเค้นสูงๆ ทนต่อการสึกหรอไม่เป็นสนิม โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติความต้านทานการสึกหรอของเหล็กกล้าทั้งสองประเภท

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการสึกหรอ มีหลายแบบซึ่งสามารถเลือกใช้ตามชนิดของการสึกหรอที่ต้องการ เช่น เครื่องทดสอบแบบทิมเคน (Timken Pressure Tester) ใช้ในการทดสอบเพื่อหาความต้านทานการสึกหรอ (Anti Wear) และความสามารถในการรับภาระสูงสุด (Extreme Pression) ในการหล่อลื่นของสารหล่อลื่นทั้งแบบเหลวและจาระบี เครื่องทดสอบฟาแล็กซ์แบบวีบล็อก (Falex Pin-on-V Block Tester) ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติต้านทานการสึกหรอของ

น้ำมันหล่อลื่น เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิสก์ (Pin-on-Disc Wear Tester) ใช้ในการจำลองกลไกการสึกหรอแบบขัดถู ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติความต้านทานการสึกหรอของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 440C และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ซึ่งเครื่องทดสอบที่ใช้ในการจำลองการสึกหรอคือเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิสก์ โดยหลักการของเครื่องทดสอบนี้คือการใช้หมุด (Pin) กดลงบนแผ่นจาน (Disc) ซึ่งวัสดุที่ใช้จะเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันเพื่อให้เกิดกลไกการลื่นไถล โดยสามารถปรับแรงกด ความเร็วรอบของแผ่นจานและเวลาที่ใช้ในการทดสอบได้ ซึ่งหลังจากการทดสอบสามารถชั่งน้ำหนักที่หายไปของหมุดและจาน เพื่อพิจารณาวัสดุคู่สัมผัสว่าวัสดุชนิดใดสึกหรอก่อนกัน หรือนำเอาเศษโลหะจากการสึกหรอไปประเมินวิเคราะห์รูปร่างลักษณะของอนุภาคสึกหรอได้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาถึงอัตราการสึกหรอของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็นและเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดมาร์เทนซิติก

1.2.2 เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับอัตราการสึกหรอและความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคกับอัตราการสึกหรอของเหล็กกล้าทั้งสองชนิดภายหลังการชุบแข็งและการอบคืนไฟ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 440C และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2

1.3.2 กระบวนการชุบแข็งเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 440C และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 แสดงดังตาราง 1.1

ตารางที่ 1.1 อุณหภูมิในการอบคืนไฟของเหล็กกล้าทั้งสองประเภท

วัสดุ	ชั้นงานที่	อุณหภูมิในการอบคืนไฟ
440C	1	150
	2	300
D2	3	450
	4	600

1.3.3 พื้นผิวหน้าของชิ้นงานมีความหยาบ 0.8 ไมครอน

1.3.4 ทดสอบความต้านทานการสึกหรอด้วยเครื่องพินออนดิสก์โดยใช้แรงกด 10 และ 50 นิวตัน เป็นระยะทาง 1000 เมตร

1.4 ผลที่ได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 ทราบถึงอัตราการสึกหรอของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 และเหล็กกล้าไร้สนิม มาร์เทนซิติค 440C

1.4.2 ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของเหล็กกล้าทั้งสองชนิดในสภาวะการอบคืนไฟที่อุณหภูมิต่างๆกับอัตราการสึกหรอ

1.4.3 ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคกับอัตราการสึกหรอของเหล็กกล้าทั้งสองชนิดภายหลังการชุบแข็ง



บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 440C เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก ที่ผสมคาร์บอนอยู่ในช่วง 0.6-1.20% และมีโครเมียมอยู่ในเกณฑ์สูงประมาณ 16.0-18.0% การผสมโครเมียมให้สูงขึ้นก็เพื่อให้ได้สมบัติทางด้านต้านทานการกัดกร่อนไม่สูญเสียไป เพราะปริมาณของโครเมียมส่วนหนึ่งจะไปรวมกับคาร์บอนให้โครเมียมคาร์ไบด์ และเหลือปริมาณของโครเมียมในโครงสร้างมาร์เทนไซต์ไว้ไม่น้อยกว่า 12% สำหรับความแข็งที่ได้ภายหลังการชุบแข็งอย่างเหมาะสมจะสูงประมาณไม่เกิน 60 HRC

เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น (Cold work tool steels) แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มชุบแข็งด้วยน้ำมัน (กลุ่ม O) กลุ่มชุบแข็งด้วยอากาศ (กลุ่ม A) และกลุ่มที่ผสมโครเมียมสูง และคาร์บอนสูง (กลุ่ม D)

กลุ่มผสมโครเมียมและคาร์บอนสูง (D) อาจผสมวาเนเดียมและโคบอลต์ บางครั้งได้ชื่อเรียกว่า เหล็กกล้าเครื่องมือ Lederburetic เนื่องจากโครงสร้างจะประกอบด้วย โครเมียมคาร์ไบด์ตกผลึกอยู่ตามขอบเกรน ในลักษณะโครงสร้างยูเทคติก เป็นกลุ่มที่มีการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น วัสดุผสมหลักคือ คาร์บอน โครเมียม และ โมลิบดีนัม โดยมีคุณสมบัติต้านทานต่อการสึกหรอสูงเป็นพิเศษ และการเสียดสีที่ดีเยี่ยม ทำให้สามารถรักษาคมตัดไว้ได้นาน ซึ่งเป็นผลมาจากการมีปริมาณคาร์ไบด์ในปริมาณสูง (มนัส สติรจินดา, 2543)

2.2 กระบวนการอบชุบทางความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 440C

จากส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติกจะเห็นว่าช่วงที่พอเหมาะในการอบให้ความร้อนคือที่อุณหภูมิ 900-1050 องศาเซลเซียส ซึ่งเฟอร์ไรต์จะเปลี่ยนไปเป็นออสเตไนต์ทั้งหมด และคาร์ไบด์จะสลายตัว ทำให้ออสเตไนต์มีคาร์บอนและธาตุผสมอื่น เช่น Cr และ Mo มากขึ้น เมื่อปล่อยให้เย็นในอากาศ (หรือชุบในน้ำมัน หากชิ้นงานหนา) จะได้โครงสร้างจุลภาคสุดท้ายเป็นมาร์เทนไซต์ที่มีความแข็งสูงและมีออสเตไนต์เหลือค้างด้วยเพราะธาตุผสมสูงทำให้ออสเตไนต์บางส่วนมีเสถียรภาพได้ ณ อุณหภูมิห้อง โดยปริมาณออสเตไนต์เหลือค้างหลังการชุบแข็งขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาในการอบให้เป็นออสเตไนต์ มาร์เทนไซต์ที่ได้หลังจากการชุบนี้ไม่เหมาะที่จะ

นำไปใช้งานทันทีเนื่องจากมีความเค้นตกค้างสะสมมากทำให้แข็งแต่เปราะ จึงต้องนำไปอบคืนไฟก่อนนำไปใช้งาน ในส่วนของออสเตไนต์เหลือค้างนั้น ควรลดให้เหลือน้อยที่สุด เนื่องจากออสเตไนต์อาจเกิดการเปลี่ยนเฟสไปเป็นมาร์เทนไซต์ระหว่างนำไปใช้งาน ซึ่งจะเกิดผลเสียในแง่ของการรักษาขนาดและรูปร่างของชิ้นงาน รวมไปถึงการแตกร้าวเมื่อใช้งาน วิธีการที่ใช้ในการลดออสเตไนต์เหลือค้างให้น้อยลงที่นิยมในปัจจุบันคือการอบคืนไฟที่อุณหภูมิในช่วง 450-500°C หลายๆ ครั้ง (ปกติ 3 ครั้งหรือมากกว่า) การอบคืนไฟซ้ำหลายครั้งนี้มีความจำเป็นมาก เพราะนอกจากเป็นการเปลี่ยนออสเตไนต์ให้กลายเป็นมาร์เทนไซต์แล้ว ยังเป็นการอบคืนไฟให้กับมาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้นใหม่หลังจากการอบคืนไฟครั้งก่อนหน้านี้อีกด้วย

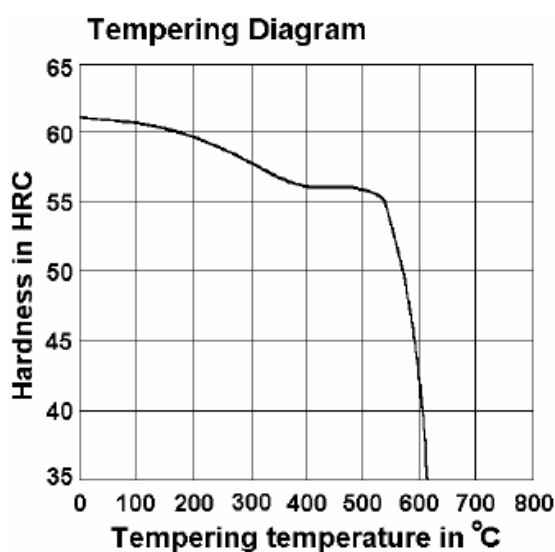
โดยปกติแล้ว การอบคืนไฟมีผลทำให้มาร์เทนไซต์กลายเป็นเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ (คาร์บอนแพร่ออกจากมาร์เทนไซต์เล็กน้อยและเริ่มก่อตัวเป็นคาร์ไบด์) ซึ่งความแข็งลดลงเล็กน้อย แต่คืนความเหนียวให้กับเหล็ก หากอุณหภูมิสูงมากมาร์เทนไซต์ซึ่งเป็นโครงสร้างในสภาพกึ่งสมดุลก็จะกลับเข้าสู่สภาพในสมดุลคือกลายเป็นเฟอร์ไรต์และคาร์ไบด์ ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคหลังการอบคืนไฟนี้ขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบชุบด้วย สำหรับกรณีเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก หรือเหล็กกล้าที่เจือคาร์บอนและโครเมียมสูง อิทธิพลของอุณหภูมิตอบคืนไฟโดยทั่วไป เป็นดังนี้

การอบคืนไฟที่อุณหภูมิต่ำกว่า 350 องศาเซลเซียส จะเกิดคาร์ไบด์ชนิด $(FeCr)_3C$ ขนาดเล็กกระจัดกระจายทั่วไปในโครงสร้างพื้นฐาน คือมาร์เทนไซต์ซึ่งการอบคืนตัวในช่วงนี้ความแข็งจะไม่ลดลงมาก แม้จะใช้เวลานานการโตต่อของโครเมียมคาร์ไบด์ก็จะเป็นไปอย่างช้าๆ โดยค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติกภายหลังการอบชุบแข็งและอบคืนไฟแสดงดังรูป 2.1

การอบคืนไฟในช่วงอุณหภูมิ 300-450 องศาเซลเซียส จะเกิดการตกผลึกของโครเมียมคาร์ไบด์ $(Fe, Cr)_7C_3$ และถ้ามีโครเมียมคาร์ไบด์ชนิด $(FeCr)_3C$ เกิดก่อนอยู่แล้ว การอบคืนตัวในช่วงอุณหภูมินี้ โครเมียมคาร์ไบด์ $(FeCr)_3C$ จะสลายตัวหมดและให้โครเมียมคาร์ไบด์ $(Fe, Cr)_7C_3$ แทน ซึ่งไม่ใช่โครเมียมคาร์ไบด์ที่อยู่ในสภาวะสมดุล ที่จริงแล้วตามแผนภูมิสมดุลโครเมียมคาร์ไบด์ที่ควรจะเป็นคือ $(Fe, Cr)_{23}C_6$ และในช่วงการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300-450 องศาเซลเซียสนี้ อาจเกิดคาร์ไบด์พิเศษ Cr_2C เกิดขึ้นได้อีก และตกผลึกอย่างกระจัดกระจาย จะมีผลทำให้เกิดการเพิ่มความแข็งหลังอบคืนไฟ (Secondary hardening) ขึ้นได้ แต่ความแข็งไม่สูงขึ้นมากนัก

การอบคืนไฟที่อุณหภูมิสูงเกินกว่า 500 องศาเซลเซียส จะเกิดการตกผลึกของคาร์ไบด์ $(Fe, Cr)_{23}C_6$ และจะโตต่อได้เร็วในขณะที่โครงสร้างพื้นฐานเดิมซึ่งเป็นมาร์เทนไซต์จะค่อยๆ เปลี่ยนไปเป็นเฟอร์ไรต์ ทำให้ความแข็งลดลงมาก เมื่อทุกๆ โครงสร้างที่ปรากฏเปลี่ยนแปลงเข้าสู่ลักษณะโครงสร้างในสภาวะสมดุล(มนัส สติริจินดา, 2543)

การบำบัดเย็น (Sub-zero treatment) เช่น การชุบลงในไนโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส ภายหลังจากการชุบแข็งจะเกิดมาร์เทนไซต์กับออสเตไนต์เหลือค้าง เมื่อผ่านการบำบัดเย็นออสเตไนต์เหลือค้างเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ให้มากที่สุดและจะยังคงมีออสเตไนต์เหลือค้างอยู่จำนวนหนึ่งแต่จะสลายตัวไปภายหลังจากการอบคืนไฟหลายครั้ง (J.R. Yang, T.H. Yu and C.H. Wang, 2006)



รูปที่ 2.1 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 440C

ภายหลังจากการชุบแข็งและอบคืนไฟที่อุณหภูมิ 1000-1050 องศาเซลเซียส (บริษัท ไทย-เยอรมันสเปเชียลตีลเซ็นเตอร์ จำกัด., Martensitic Stainless Steel 4125)

2.3 กระบวนการอบชุบทางความร้อนของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น D2

การชุบแข็งเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ต้องกระทำพิเศษเนื่องจากมีปริมาณคาร์ไบด์ในปริมาณสูง และโครงสร้างเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ภายหลังการชุบแข็งและอบคืนไฟ โดยต้องทำออสเตไนต์ซิงที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้การสลายตัวของโครเมียมคาร์ไบด์เกิดได้มากพอสมควร และภายหลังการชุบแข็งแล้วต้องอบคืนตัวสองถึงสามครั้งติดต่อกัน เนื่องจากเหล็กกล้ากลุ่มนี้ให้คุณสมบัติ Secondary hardening คือเป็นลักษณะที่พบในเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนปานกลางถึงสูงและมีธาตุผสมที่มาจับตัวกับคาร์บอนแล้วเกิดการตกผลึกเป็นคาร์ไบด์ในระหว่างการอบคืนไฟได้ในปริมาณมากพอสมควร ธาตุผสมดังกล่าว เช่น โมลิบดีนัม และโครเมียม เป็นต้น โดยภายหลังการชุบแข็งมักมีออสเตไนต์เหลือค้างและเมื่อนำมาอบคืนตัวที่ช่วงอุณหภูมิ 500-600°C ธาตุผสมเหล่านี้ในออสเตไนต์จับตัวกับคาร์บอนเกิดเป็นคาร์ไบด์และทำให้ออสเตไนต์มีคาร์บอนลดต่ำลง เส้นอุณหภูมิสิ้นสุดการเกิดมาร์เทนไซต์ (M_s) จึงกลับมาสูงขึ้นเหนืออุณหภูมิห้องเมื่อปล่อยเย็นตัวก็จะเกิดมาร์เทนไซต์ใหม่เพิ่มขึ้นมา ค่าความแข็งจึงสูงขึ้นจากทั้งคาร์ไบด์และมาร์เทนไซต์ใหม่นี้ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Secondary hardening

ขั้นตอนในการอบชุบเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่ม D หลังขึ้นรูปควรอบคลายความเค้นตกค้าง (Stress-Relief) ก่อนการชุบแข็ง ส่วนการทำออสเตไนต์ซิง ควรทำที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1000 องศาเซลเซียส การเผาเตรียมตัวชุบแข็งต้องกระทำเป็นขั้นๆ คือที่ อุณหภูมิ 400 650 และ 900 องศาเซลเซียส สุดท้ายจะเผาขึ้นไปจนถึงอุณหภูมิชุบแข็ง คือประมาณอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส สำหรับอัตราการเย็นตัว ใช้การเย็นตัวในอากาศหรือน้ำมัน (หากชิ้นงานหนา) เพราะเหล็กมีความสามารถในการชุบแข็งสูง ขั้นสุดท้าย คือการอบคืนไฟ ซึ่งควรทำมากกว่าหนึ่งครั้งที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส ดังรายละเอียดแสดงในรูปที่ 2.2 ในกรณีที่ต้องการความแข็งสูงมาก จะใช้วิธีชุบแข็งผิวด้วยวิธีไนโตรซิง ในขณะทำการอบคืนไฟที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส จะได้ความแข็งที่ผิวสูงขึ้น โดยที่ภายในก็มีความแข็งสูงด้วย(มนัส สติรจินดา, 2543) โดยค่าความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ภายหลังการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1000-1050 องศาเซลเซียสแสดงดังรูป 2.3 (บริษัท ไทย-เยอรมันสเปเชียลสตีลเซ็นเตอร์ จำกัด., Cold Work Steel 2379.)

การบำบัดเย็น (Sub-zero treatment) เป็นขั้นตอนของการชุบที่ต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส ซึ่งสารที่ใช้ชุบมีทั้งน้ำแข็งแห้ง (Solid carbon dioxide หรือ dry ice) ฮีเลียมเหลวอุณหภูมิ -268 องศาเซลเซียส และไนโตรเจนเหลว -196 องศาเซลเซียส เป็นต้น การบำบัดเย็นทำเพื่อให้เหล็กคงรูปและขนาดที่แน่นอนมีการเปลี่ยนแปลงขนาดน้อยมาก โดยการทำให้ออสเตไนต์เหลือค้าง (retained austenite) เปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์มากที่สุดทั้งนี้เพราะเหล็กกล้าเครื่องมือส่วนใหญ่ผสมธาตุต่างในปริมาณสูง ซึ่งจะมีผลในการลดอุณหภูมิเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงจากออสเตไนต์ไปเป็นมาร์เทนไซต์

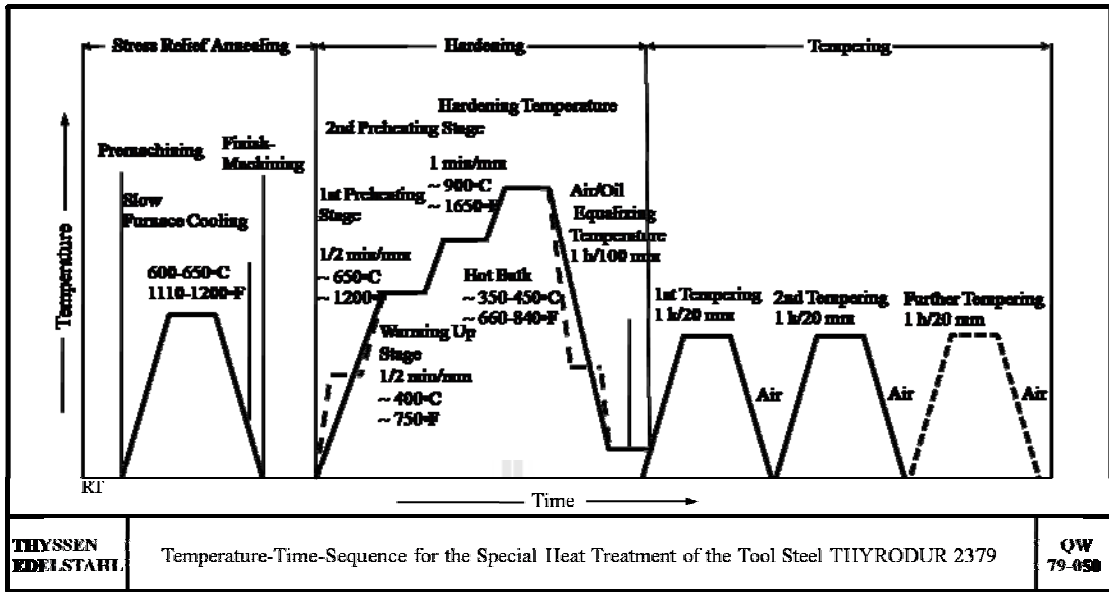
(M_s) ให้ลดต่ำลงและต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส ดังนั้นภายหลังจากการบำบัดเย็นจึงยังคงมีออสเตไนต์เหลือค้างอยู่จำนวนหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับ ปริมาณของธาตุผสมในเหล็กกล้า อุณหภูมิของออสเตไนต์ และอัตราการเย็นตัว

โดยหลักการทั่วไปแล้ว เราไม่ต้องการให้มีออสเตไนต์เหลือค้างภายหลังการชุบแข็ง โดยเหตุผล 2 ประการคือ

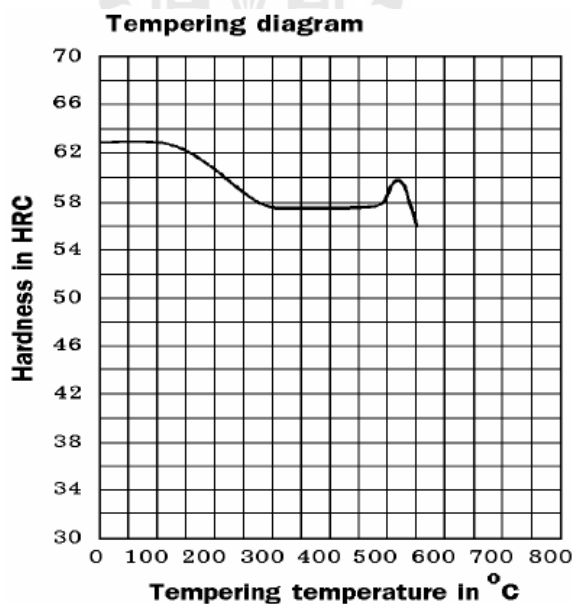
2.3.1 ออสเตไนต์เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งต่ำ ถ้าภายหลังการชุบแข็งมีออสเตไนต์เหลือค้างปริมาณสูง ความแข็งของเหล็กจะน้อยกว่าที่ควรจะเป็น

2.3.2 ออสเตไนต์เหลือค้าง มีโอกาสเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ได้ เมื่อถูกแรงกดหรือดึง ในขณะใช้งาน ซึ่งโดยคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของออสเตไนต์จะมีปริมาตรจำเพาะ (Specific volume) ต่ำกว่ามาร์เทนไซต์ ดังนั้นเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงย่อมส่งผลโดยตรงกับขนาดของชิ้นงาน กล่าวคือ มีการขยายตัวอย่างแน่นอนในสภาพของแข็ง และเกิดความเครียดกับชิ้นงานเหล็กที่อุณหภูมิห้อง ส่งผลให้เกิดการแตกร้าว เกิดความเสียหายเพราะอายุการใช้งานของเครื่องมือจะสั้นลง(มนัส สติรจินดา, 2543)

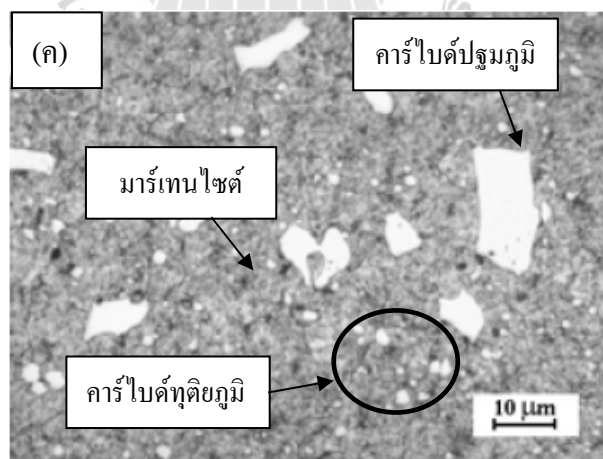
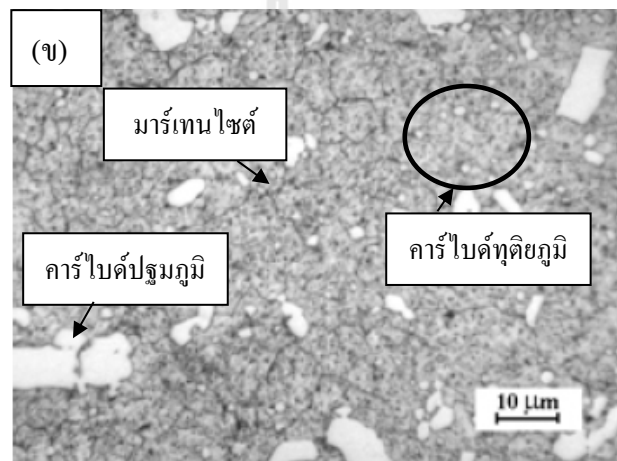
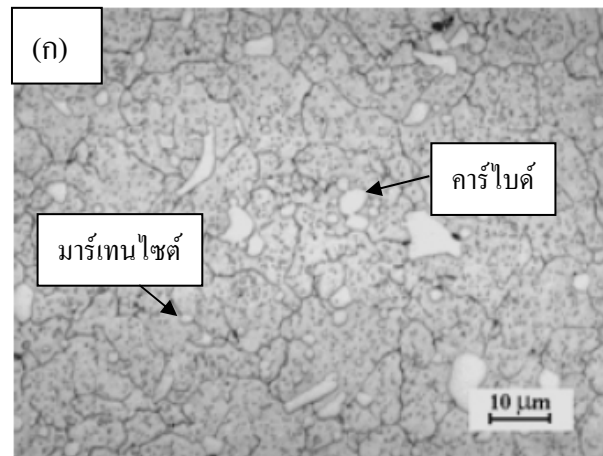
โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 หลังจากการทำออสเตไนต์ไอซิงที่ 1020 องศาเซลเซียส ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ และอบคืนไฟ 1 ครั้ง และ 2 ครั้งตามลำดับ แสดงในรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าการอบคืนไฟ 2 ครั้งทำให้เกิดคาร์ไบด์เม็ดกลมขนาดเล็กจำนวนมากขึ้น มาร์เทนไซต์ของโครงสร้างพื้นมีมากกว่าการเย็นตัวในอากาศ(สิริพร โรจนนันต์, สุรศิษฐ์ โรจนนันต์ และ สุทัศน์ ทิพย์ปรีกมาศ, 2007)



รูปที่ 2.2 การอบคลายความเครียด, การชุบแข็ง และการอบคืนตัวเหล็กกล้า AISI D2 (มนัส สติรจินดา, วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.,2543)



รูปที่ 2.3 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ภายหลังจากการชุบแข็งและอบคืนไฟ ที่อุณหภูมิ 1000-1050 องศาเซลเซียส (บริษัท ไทย-เยอรมันสเปเชียลสตีลเซ็นเตอร์ จำกัด., Cold Work Steel 2379.)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 หลังชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1020 องศาเซลเซียส
 (ก) เย็นตัวในอากาศ (ข) อบคืนไฟ 1 ครั้ง (ค) อบคืนไฟ 2 ครั้ง
 (สิริพร โรจนนันต์, สุรศิษฐ์ โรจนนันต์ และ สุทัศน์ ทิพย์ปรีกมาศ, 2007)

2.4 ชนิดของบรรยากาศที่ใช้ในการอบชุบ

ชนิดของบรรยากาศที่ใช้ในการอบชุบ เนื่องจากในการอบชุบของเหล็กสำหรับผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ต้องการผิวเหล็กที่สะอาดปราศจากออกไซด์และต้องการความแข็งที่ผิวสม่ำเสมอและแน่นอน ดังนั้นการอบชุบที่กระทำภายในเตาจึงจำเป็นต้องควบคุมบรรยากาศภายในเตาโดยจุดมุ่งหมายของการควบคุมบรรยากาศภายในเตาคือ

2.4.1 ป้องกันการสูญเสียคาร์บอน และธาตุอื่นๆ ที่สำคัญขณะทำการเผาในระยะเวลานาน

2.4.2 ป้องกันการเกิดออกไซด์ตามบริเวณผิวทำให้เกิดปัญหาในการกำจัดภายหลัง

2.4.3 ในกรณีที่ต้องการปรับปรุงความแข็งบริเวณผิวของชิ้นงานทดสอบให้สูงขึ้นสามารถกระทำได้ด้วยการควบคุมบรรยากาศภายในเตา(มนัส สติรจินดา,2543)

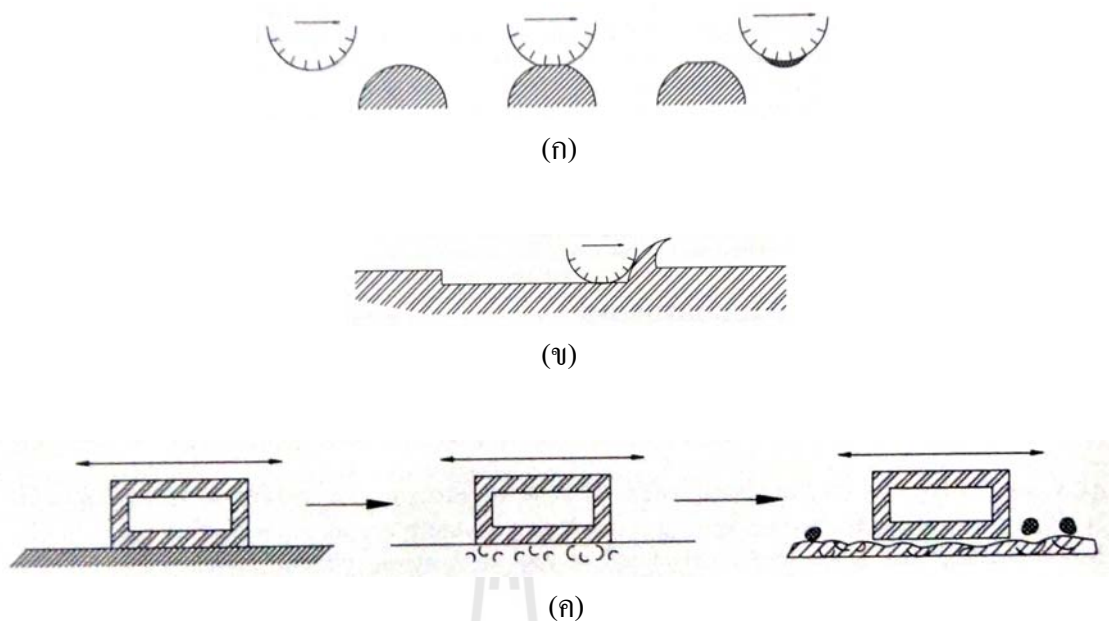
2.5 กลไกการสึกหรอ (Wear Mechanisms) สามารถแบ่งประเภทของการสึกหรอออกเป็น 4 ลักษณะคือ

2.5.1 การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear) เกิดจากการสัมผัสกันของยอดแหลมของเนื้อวัสดุ ซึ่งทำให้เกิดชั้นของเนื้อวัสดุที่เชื่อมติดเข้าด้วยกัน และขาดออกจากกัน การสึกหรอแบบนี้มักเกิดจากการเคลื่อนที่แบบเลื่อนไถล และการหล่อลื่นไม่เพียงพอ มักเกิดเศษโลหะขึ้นระหว่างผิวสัมผัส

2.5.2 การสึกหรอแบบขูดขีด (Abrasive Wear) เกิดจากการที่เนื้อวัสดุหลุดหายไปอันเนื่องมาจากถูกขูดขีดหรือถูกขูดเป็นร่องลึก (2-body Abrasion) หรือเกิดจากการที่มีเศษผง ฝุ่นละออง หรือเศษโลหะที่มีความแข็งมาก ๆ แทรกอยู่ระหว่างผิวสัมผัส (3-body Abrasion) ทั้งนี้การสึกหรอแบบนี้มักเป็นผลเนื่องมาจากการสึกหรอแบบยึดติดด้วย

2.5.3 การสึกหรอแบบล้าตัว (Fatigue Wear) เกิดจากการล้าตัวของเนื้อวัสดุ ซึ่งจะเห็นว่าผิวของวัสดุมีหลุม รอยแตกหรือรอยแยก (Spalling and Fissuring or Cracking) อันเป็นผลมาจากการเสียรูปทั้งแบบถาวรและแบบคืนรูปร่างเดิมได้ (Plastic and Elastic Deformation) การล้าตัวของวัสดุมักเกิดกับชิ้นส่วนที่ต้องรับภาระสลับ (Cyclic load) เป็นเวลานาน

2.5.4 การสึกหรอที่ชั้นผิวโดยปฏิกิริยาไตรโบเคมี (Surface Layer Wear by Tribochemical Reactions) เกิดจากการที่ผิวสัมผัสเกิดการขัดสีและเกิดผลพวงจากปฏิกิริยาทางเคมี โดยเฉพาะ "ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation)" บางครั้งอาจเรียกว่า การสึกหรอจากการกัดกร่อน (Corrosion wear) (Gunter Mennig, 1995)



รูปที่ 2.5 การสึกหรอแบบต่างๆ (ก) การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive)

(ข) การสึกหรอแบบขูดขีด (Abrasive)

(ค) การสึกหรอแบบล้าตัว (Fatigue Wear) (Gwidon W Stachowiak, 2005)



ลักษณะการสึกหรอของชิ้นส่วนโลหะที่มักพบในอุตสาหกรรมทั่วไป สามารถจำแนกได้เป็น 4 ประเภทคือ

1. การสึกหรอระหว่างโลหะหรือการสึกหรอแบบไถลในกรณีที่มีสารหล่อลื่น
2. การสึกหรอแบบไถลในกรณีไม่มีสารหล่อลื่น
3. การสึกหรอแบบขัดถูซึ่งเป็นการสึกหรอจากผิวหรืออนุภาคแข็งที่มากระทำ
4. การสึกหรอที่เกิดจากความล้าและการสึกหรอแบบถูครูด

ในตารางที่ 2.1 เป็นการรวบรวมรูปแบบการสึกหรอและกลไกทั้งหมดที่เกิดกับวัสดุประเภทโลหะ โดยใช้หลักการในการแบ่งแยกประเภทของการสึกหรอตามปัจจัยหลักบางประการดังต่อไปนี้

1. สภาพการสึกหรอ คือข้อมูลที่อธิบายถึงสถานการณ์ของการทำงานที่ทำให้เกิดการสึกหรอ เช่น ลักษณะและรูปร่างของผิวสัมผัส ปริมาณความเค้นที่เกิดขึ้น ความเร็วรอบหรือความเร็วสัมพัทธ์ ณ จุดสัมผัส เป็นต้น
2. กลไกการสึกหรอ คือกลไกที่เกิดขึ้นในระดับจุลภาค ณ จุดสัมผัสที่ทำให้เกิดการสึกหรอ ซึ่งรวมถึงลักษณะการยึดติดกันของอะตอม การเสียดรูปแบบพลาสติก และการหลุดออกของเนื้อโลหะกลายเป็นเศษการสึกหรอ เป็นต้น
3. หลักฐานและข้อมูลทางเทคนิค คือข้อมูลที่สามารถติดตามวัดผลและแสดงออกมาอย่างชัดเจนได้ เช่น อัตราการสึกหรอ การเปลี่ยนแปลงของอัตราการสึกหรอ ลักษณะสำคัญของผิวที่สึกหรอและเศษของการสึกหรอ เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 หมวดและชนิดของการสึกหรอในโลหะ(ดร.ปนัดดา นิรนาทล้ำพงศ์ และคณะ, 2004)

หมวดการสึกหรอ	ชนิดการสึกหรอ	ลักษณะการเกิด	ลักษณะที่ปรากฏ
A การสึกหรอระหว่างโลหะ (Metal to Metal Wear)	1.การสึกหรอแบบไถลขั้นรุนแรง (Severe metal to metal sliding wear)	การไถลของโลหะบนโลหะ	อัตราการสึกหรอสูง เศษที่หลุดออกจากผิวยังคงสภาพเป็นโลหะเหมือนเดิม
	2.การสึกหรอแบบไถลเพียงเล็กน้อย (Mild metal to metal sliding wear)	การไถลของโลหะบนโลหะ	อัตราการสึกหรอต่ำ และเศษการสึกหรอที่หลุดออกจากผิวถูกออกไซด์
	3.การสึกหรอแบบถูครูด (Fretting wear)	การสั่นสะเทือนที่ผิวสัมผัสระหว่างโลหะ	เป็นแอ่งของออกไซด์

ตารางที่ 2.1 หมวดและชนิดของการสึกหรอในโลหะ(ต่อ)(ดร.ปนัดดา นิรนาทลีพงษ์ และคณะ, 2004)

หมวดการสึกหรอ	ชนิดการสึกหรอ	ลักษณะการเกิด	ลักษณะที่ปรากฏ
	4.การสึกกร่อนจากการชนของอิเล็กตรอน (Electric discharge erosion)	การอาร์กหรือเกิดสะเก็ดไฟระหว่างผิวโลหะ	ผิวเป็นรูและมีร่องรอยของการหลอม
	5.การสึกหรอระหว่างโลหะที่อุณหภูมิสูง (High temperature metal to metal)	โลหะร้อนกลิ้งไถลบนโลหะร้อน	ผิวอ่อนตัวมีเศษออกไซด์หลุดออกมา
	6.การสึกหรอจากความล้าที่เกิดจากการกลิ้ง (Rolling contact fatigue wear)	การสัมผัสระหว่างผิวโลหะจากการกลิ้ง	ผิวเป็นรู (Pitting) หลังเกิดการเคลื่อนที่ไประยะหนึ่ง
	7.การสึกหรอจากความล้าที่เกิดจากการชน (Solid body impact fatigue wear)	การชนซ้ำๆ	ผิวหลุดร่อนหลังจากชนได้ระยะหนึ่ง
B การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear)	8.การสึกหรอแบบขัดถูร่วมกับการกระแทก/การปะทะของอนุภาคแข็ง (Impact abrasion)	การชนซ้ำๆพร้อมกับขูด	(ยังไม่มีกรณีอธิบายอย่างชัดเจน)
	9.การสึกหรอจากการชนด้วยแรงมาก (Gouging abrasion)	การชนด้วยอนุภาคขนาดใหญ่และเกิดความเค้นที่ผิวสูง	ผิวเป็นร่องลึก เกิดการเสียรูป
	10.การสึกหรอแบบขัดถูชนิดความเค้นสูง (Grinding abrasion)	การชนที่มีความเค้นมากพอที่จะทำให้อนุภาคแตก	อัตราการสึกหรอสูง รอยขีดข่วนสามารถมองเห็นได้
	11.การสึกหรอแบบขัดถูชนิดความเค้นต่ำ (Low stress abrasion)	การชนที่ความเค้นไม่มากพอที่จะทำให้อนุภาคแตก	อัตราการสึกหรอต่ำ และรอยขีดข่วนเล็กๆ

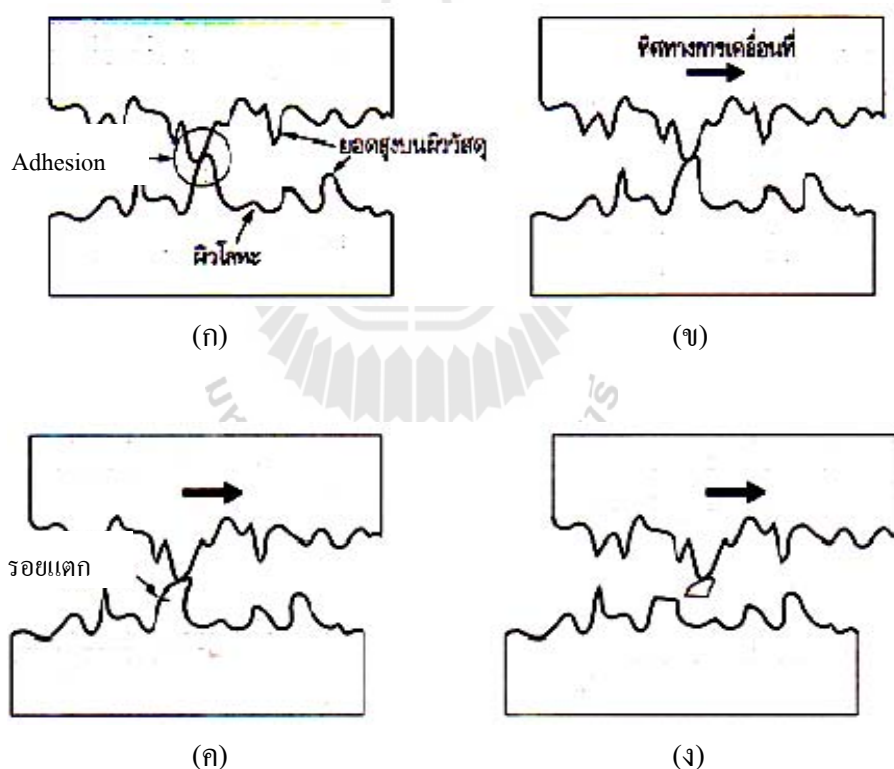
ตารางที่ 2.1 หมวดและชนิดของการสึกหรอในโลหะ(ต่อ)(ดร.ปนัดดา นิรินาทลี้พงษ์ และคณะ, 2004)

หมวดการสึกหรอ	ชนิดการสึกหรอ	ลักษณะการเกิด	ลักษณะที่ปรากฏ
	12.การสึกหรอร่วมกับการกัดกร่อน (Cossosion-abrasion)	การกัดกร่อนเกิดพร้อมกับการสึกหรอแบบขัดถู	ลักษณะปรากฏหลากหลาย การกัดกร่อนเกิดเร็วขึ้น
C การสึกหรอจากการชนของของไหล (Fluid Erosion)	13.การสึกกร่อนจากการชนของอนุภาค (Solid particle erosion)	การชนของอนุภาคขนาดเล็กในของไหลที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง	ลักษณะร่องรอยการสึกกร่อนที่ปรากฏบนผิวจะสัมพันธ์กับรูปแบบของการไหล
	14.การสึกกร่อนจากการชนของหยดของเหลว (Liquid droplet erosion)	การชนด้วยลำของเหลวหรือสเลอรี (Slurry)	อัตราการสึกกร่อนไม่สูงมาก และผิวเป็นหลุม
	15.การสึกกร่อนจากการชนของหยดของเหลว (Liquid droplet erosion)	การชนด้วยหยดของเหลวหรือการฟุ้งของเหลว	อัตราการสึกกร่อนไม่สูงมาก และผิวเป็นหลุม
	16.การสึกกร่อนจากการแตกฟองของอากาศ (Cavitation erosion)	การเกิดและแตกของฟองอากาศในลำของเหลว	อัตราการสึกกร่อนสูง ผิวเป็นหลุม
	17.การสึกกร่อนร่วมกับการกัดกร่อน (Erosion-corrosion)	ของเหลวที่มีสมบัติกัดกร่อน เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง	การสึกกร่อนและกัดกร่อนเกิดขึ้นเร็ว
	18.การสึกกร่อนที่อุณหภูมิสูง (High temperature erosion)	อากาศร้อนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง	การเกิดออกซิเดชันเร็วขึ้น

การสึกหรอแบบลื่นไถลมักจะถูกเรียกว่าเป็นการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive wear) หรือการสึกหรอระหว่างโลหะกับโลหะ (Metal to metal wear) ดังแสดงในตารางที่ 2.1 คำว่า “การสึกหรอระหว่างโลหะ” เป็นชื่อกลางที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางเพราะได้รวมเอาการสึกหรอที่สำคัญเข้าไว้ด้วยกัน รวมทั้งการสึกหรอจากการไถล การสึกหรอเนื่องจากความล้า (Rolling contact fatigue) และการสึกหรอแบบถูครูด (Fretting wear) เป็นต้น ถึงแม้ว่าการสึกหรอแบบยึดติดจะเป็นกลไกหลักของการสึกหรอแบบลื่นไถลแต่ก็ยังมีกลไกรูปแบบอื่นที่สำคัญที่อาจเกิดร่วมได้อีก เช่น

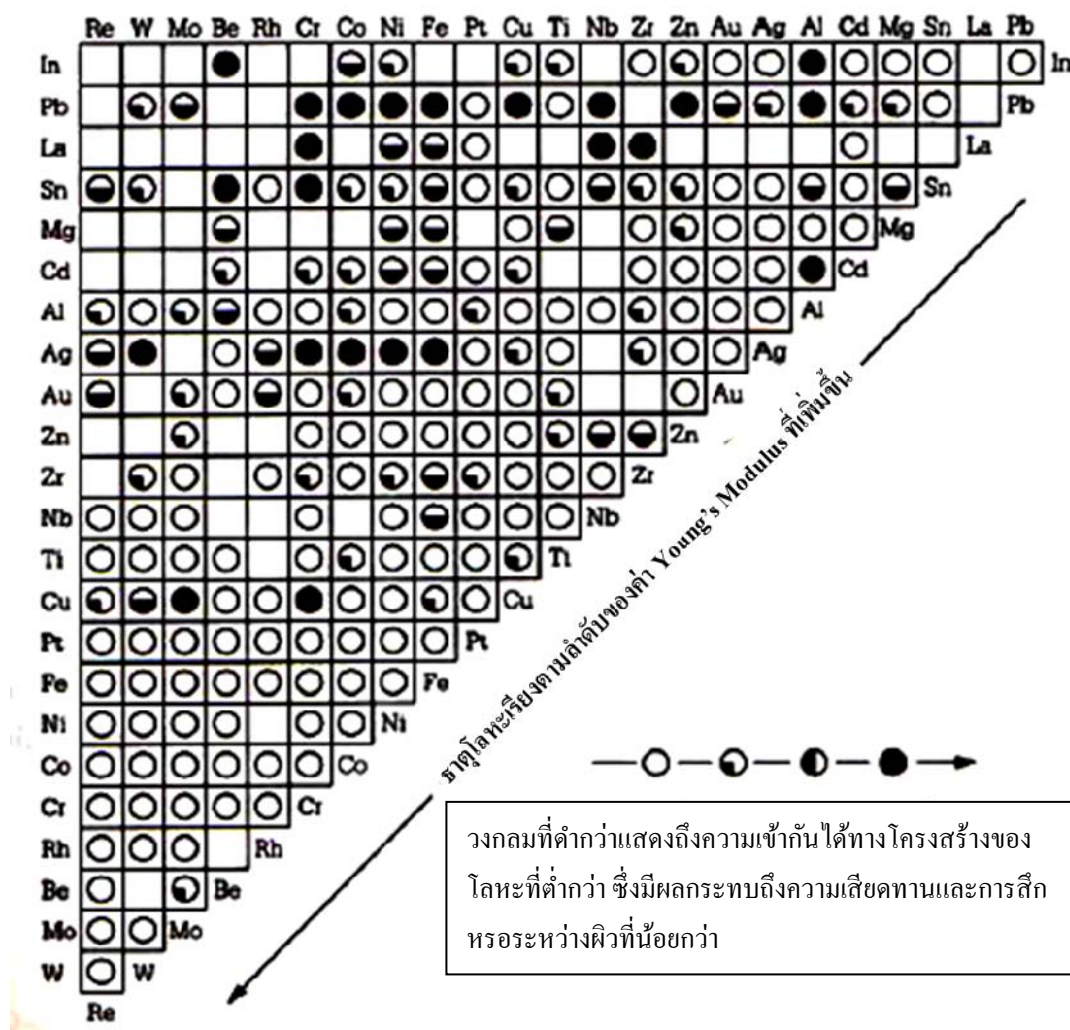
การแตกแยกชั้น (Delamination) การเกิดออกซิเดชัน การไถในระดับจุลภาค (Microploughing) และการหลอม เป็นต้น

การสึกหรอของเนื้อโลหะบนเนื้อโลหะ ลักษณะของคู่ผิวสัมผัส เมื่อผิวหน้าของโลหะ 2 ผิวหน้าเคลื่อนที่เข้ามาสัมผัสกันภายใต้แรงกด พันธะทางโลหะจะเกิดขึ้นได้ ณ บริเวณจุดสัมผัส พันธะที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ยอดสูง (Asperity) ของวัสดุมาแตะกันนี้เรียกว่าเป็นพันธะแบบยึดติด หรือ Adhesion ในขณะที่ผิวหน้า 2 ผิวเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างกัน พันธะแบบยึดติดจะสามารถขยับและหลุดแตกออกจากกันได้ ในขณะที่เดียวกัน ยอดสูงเหล่านี้ก็อาจเกิดการแตกหักออกได้เช่นกัน ถ้าหากว่าความแข็งแรงของพันธะโลหะนี้มีค่าสูงกว่าความแข็งแรงของยอดสูงของผิวหน้าหนึ่ง ยอดสูงนั้นก็แตกและผิวหน้านั้นก็จะสูญเสียเนื้อวัสดุไปให้กับคู่ผิวสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 พื้นผิวของวัสดุที่มองเห็นด้วยตาเปล่าว่าเรียบ แต่จะมีความขรุขระในระดับจุลภาคเสมอ เมื่อสัมผัสกันจึงเกิดเป็นจุดสัมผัส (ในวงกลม) ขึ้น ณ ยอดสูงบนผิวนั้น เมื่อมีพันธะแบบยึดติดเกิดขึ้น การเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างผิวหน้าจะทำให้เกิดการแตกหักของยอดสูงได้ (ดร.ปนัดดา นิรนาทล้ำพงศ์ และคณะ, 2004)

ในช่วงที่เกิดการสีกหรือ การสร้างพันธะแบบยึดติดและการแตกหักของผิววัสดุจะเกิดขึ้นพร้อมๆกันอย่างต่อเนื่อง เป็นผลทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุจากผิวหนึ่งไปยังอีกผิวหนึ่งตลอดเวลา ซึ่งมักจะเกิดขึ้นทั้ง 2 ทาง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าวัสดุมีโครงสร้างลักษณะคล้ายกัน หรือมีความเข้ากันได้ทางโครงสร้าง (Structural compatibility) ที่ดี เนื่องจากค่าความเสียดทานระหว่างผิววัสดุจะขึ้นอยู่กับค่าความเข้ากันได้นี้ เช่น โลหะโครเมียมกับทองแดงมีความเข้ากันได้ทางโครงสร้างต่ำ ดังนั้นความเสียดทานและการสีกหรือที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 ผิวนี้จึงมีค่าต่ำด้วยดังแสดงในรูป 2.7



รูปที่ 2.7 ผลกระทบจากลักษณะโครงสร้างของกลุ่มผิวสัมผัสกับการสีกหรือ (ดร.ปนัดดา นิรินาทล้ำพงศ์ และคณะ, 2004)

ถ้าหากว่าวัสดุ A มีความแข็งแรงทางกลมากกว่าวัสดุ B โดยรวมวัสดุ B จะสูญเสียเนื้อให้กับวัสดุ A ในขณะที่วัสดุแตกออก ผิวหน้าใหม่ที่เปิดขึ้นบริเวณรอยแตกจะเกิดการออกซิเดชันซึ่งปฏิกิริยาจะถูกเร่งโดยความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีทำให้เกิดผิวออกไซด์บนผิววัสดุ เมื่อการสึกหรอดำเนินต่อไปและเกิดการแตกหักของยอดสูงอย่างต่อเนื่อง เศษของเนื้อวัสดุที่แตกออกก็จะมาทับถมบนผิวหน้า สร้างเป็นชั้นขึ้นมา ซึ่งชั้นนี้ก็มีออกไซด์ของโลหะปะปนอยู่ด้วย (ออกไซด์ที่ฝังตัวอยู่จะทำให้เนื้อวัสดุบริเวณนั้นแตกง่าย) บางครั้ง ชั้นของเศษทับถมก็จะหลุดล่อนออกมา ทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุจากทั้ง 2 ผิวสัมผัส

ดังนั้นพฤติกรรมการสึกหรอจึงขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุโลหะทั้ง 2 ที่เข้ามาสัมผัสกัน โดยพันธะแบบยึดติดจะเกิดขึ้นได้ง่ายหากผิวสัมผัสมีความสะอาด ปราศจากออกไซด์บนผิวหน้า และมีออกไซด์ที่เกิดขึ้นใหม่น้อย และคู่ผิวสัมผัสมีความคล้ายกันหรือเข้ากันได้ทางเคมีและโครงสร้างของวัสดุ (ดร.ปนัดดา นิรนาทล้ำพงศ์ และคณะ, 2004)

2.6 เครื่องมือทดสอบการสึกหรอ

เครื่องมือทดสอบการสึกหรอที่ใช้ในการจำลองการสึกหรอแบบต่างๆมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ใกล้เคียงกับลักษณะการใช้งานจริง แต่เนื่องจากข้อจำกัดหลายๆอย่าง เช่น ค่าใช้จ่าย ระยะเวลา ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ต้องจำลองการสึกหรอบนเครื่องทดสอบ โดยเครื่องมือทดสอบมีการพัฒนาหลักการเคลื่อนที่ให้ใกล้เคียงกับการใช้งานจริง โดยมีมาตรฐานสากลเป็นที่ยอมรับ เช่น ASTM, ASME, ISO เป็นต้น

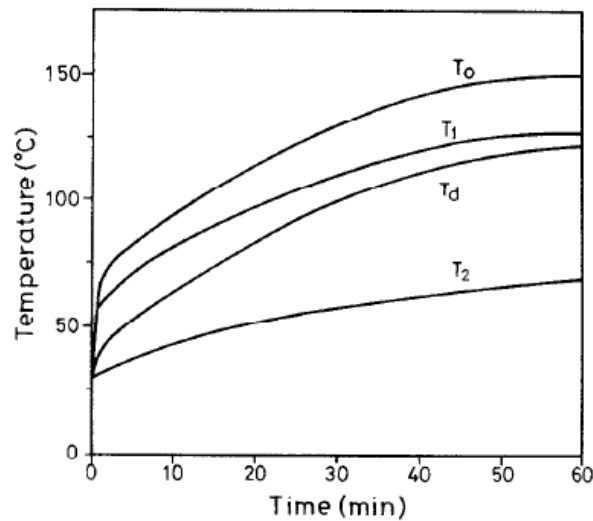
เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิสก์ (Pin-on-Disc Wear Tester) เป็นการจำลองกลไกการสึกหรอ ซึ่งนิยมใช้ในห้องทดสอบมากที่สุด โดยหลักการของเครื่องทดสอบนี้คือการใช้หมุด (Pin) กดลงบนแผ่นจาน (Disc) โดยวัสดุจะเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันแต่จะมีข้อกำหนดคือชิ้นงานต้องมีขนาดที่แน่นอน และสามารถทนความเค้น (Stress) ที่เกิดขึ้น โดยไม่เกิดการโก่งงอ โดยทั่วไปชิ้นงานที่เป็นหมุด จะมีรูปทรงเป็นทรงกระบอก หรือทรงกลมซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 2-10 มิลลิเมตร และชิ้นงานที่เป็นแผ่นจานมีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 30-100 มิลลิเมตร และมีความหนาอยู่ในช่วง 2-10 มิลลิเมตร ชิ้นงานต้องมีความหยาบผิวประมาณ 0.8 ไมครอน เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่แบบลื่นไถล โดยสามารถปรับแรงกดความเร็วรอบของแผ่นจาน และเวลาในการทดสอบให้เหมาะสมได้ และภายหลังจากการทดสอบจะมีการชั่งน้ำหนักที่หายไปของหมุดและแผ่นจาน เพื่อพิจารณาว่าวัสดุคู่สัมผัสว่าวัสดุชนิดใดเกิดการสึกหรอก่อนกัน หรือสามารถนำเอาเศษโลหะจากการสึกหรอไปวิเคราะห์รูปร่าง ลักษณะของอนุภาคการสึกหรอ รวมไปถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในขณะที่ทดสอบด้วย



ภาพที่ 2.8 เครื่องทดสอบแบบพินออนดิสก์ (Pin-on-disc)

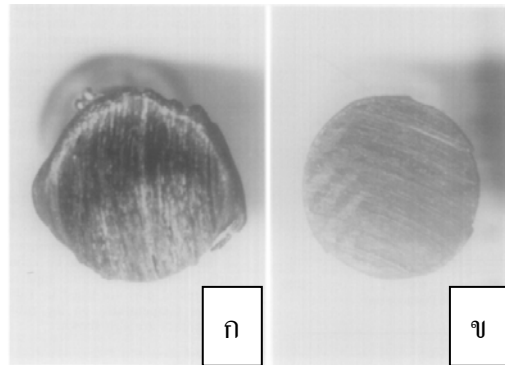
2.7 ความต้านทานการสึกหรอ

จากการทดลองของ H.So (1996) ได้ศึกษากลไกของแรงเสียดทานและการสึกหรอจากการทดสอบพินออนดิสก์ซึ่งกำหนดตำแหน่งของหมุดให้หมุดติดแน่นอยู่กับที่และให้แผ่นจานหมุนส่วนอีกอันให้หมุดหมุนและให้แผ่นจานอยู่กับที่โดยกำหนดให้ความเร็วในการไถล 0.2-8 m/s แรงกดอยู่ในช่วง 9.8-392 นิวตัน แรงเค้นในช่วง 0.55-22 MPa ช่วงระยะเวลาในการทดสอบขึ้นอยู่กับวัสดุที่ดู เมื่อวัดอุณหภูมิในขณะที่หมุดคงที่และแผ่นจานหมุน ปรากฏว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามเวลาในการถูที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.9 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชิ้นงานกับเวลาในการถูของแผ่นจานอะลูมิเนียม 6061 ที่ไถลกับหมุดที่ทำจากเหล็กกล้าแม่พิมพ์ทดสอบที่ความเร็ว 1 m/s และความเค้น 2.2 MPa



รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชิ้นงานกับเวลาในการดูของแผ่นจานอะลูมิเนียม 6061 ที่ไหลกับหมุดที่ทำจากเหล็กกล้าแม่พิมพ์ทดสอบที่ความเร็ว 1 m/s และ 2.2 MPa (H.So, 1996)

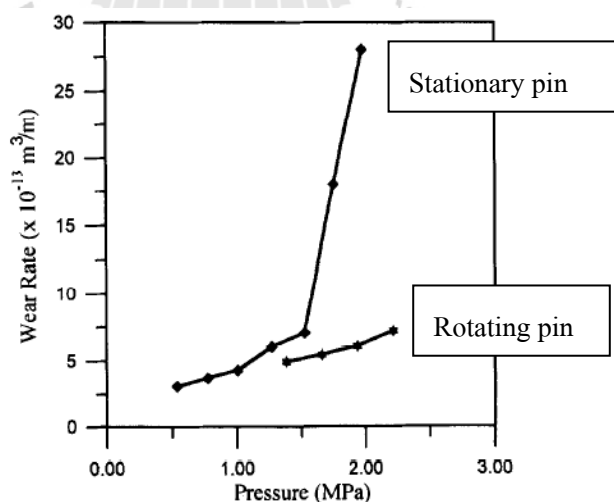
การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (natural convection) และการพาความร้อนแบบบังคับ (forced convection) ในขณะทดสอบเมื่อความเร็วของหมุดสูงกว่า 0.2 m/s การพาความร้อนของบรรยากาศเพิ่มขึ้นกับความเร็วเพิ่มขึ้น ดังนั้น อุณหภูมิของหมุดและแผ่นจานในตำแหน่งที่หมุดหมุนต่ำกว่าหมุดคงที่ รูปที่ 2.10 แสดงพฤติกรรมการสึกหรอของหมุดซึ่งบ่งชี้ให้เห็นการสึกหรอของหมุดหมุนและหมุดคงที่ที่ทดสอบภายใต้แรงกดดัน 5.5 MPa ความเร็วในการไหล 4 m/s โดยหมุดคงที่เมื่อทดสอบเสร็จสิ้นแล้วมีรูปร่างเป็นหอคดง แสดงในรูป 2.10 (ก) และอุณหภูมิของหมุดคงที่สูงกว่าหมุดหมุนในขณะที่ทดสอบที่แรงกดและความเร็วเดียวกัน



รูป 2.10 การเปรียบเทียบลักษณะการสึกหรอระหว่างผิวหน้าที่ถูกของหมุดที่ลักษณะต่างกัน โดยหมุดทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนสูง ($H_v=210$) และแผ่นจานทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง ($H_v=160$) ที่ 4 m/s และ 5.5 MPa
(ก) หมุดอยู่หนึ่งกับที่ (ข) หมุดหมุน (H.So, 1996)

ชนิดของวัสดุคู่สัมผัส รวมทั้งสมบัติทางกลเป็นตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการสึกหรอ โดยกรณีวัสดุคู่สัมผัสชนิดเดียวกัน

- ถ้าหมุดและแผ่นจานทำจากวัสดุชนิดเดียวกัน ปริมาณของการสึกหรอจะถูกควบคุมโดยหมุดดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 เปรียบเทียบอัตราการสึกหรอระหว่างวัสดุคู่สัมผัสชนิดเดียวกัน ของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางที่ความเร็วในการไถลคงที่ 2 m/s (H.So, 1996)

กรณีของวัสดุคู่สัมผัสต่างชนิดกัน

- ความแข็งอยู่ในระดับเดียวกัน ถ้าวัสดุคู่สัมผัสมีความแข็งอยู่ในระดับเดียวกันที่อุณหภูมิห้อง อัตราการสึกหรอของทั้งคู่จะควบคุมแผ่นงาน แม้ว่าค่าความแข็งของทั้งคู่สูงกว่าของแผ่นงานที่อุณหภูมิห้องก็ตาม
- ความแข็งของชิ้นงานหนึ่งสูงกว่าอีกชิ้นงาน ในสภาวะการสึกหรอถูกควบคุมโดยวัสดุที่อ่อนกว่า ไม่ว่าวัสดุที่อ่อนกว่าจะถูกขึ้นรูปเป็นหมุดหรือแผ่นงานก็ตาม

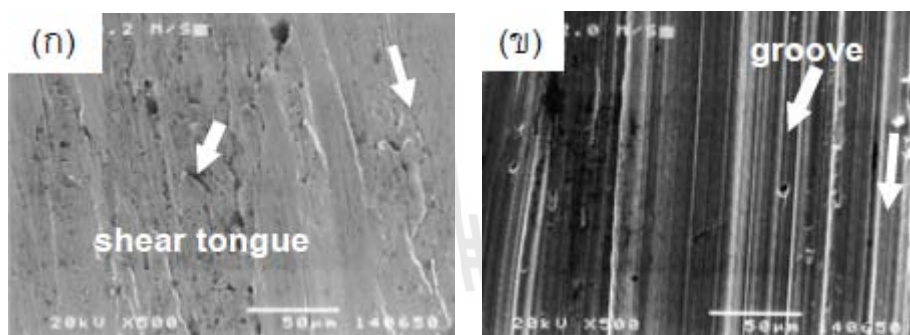
2.8 พื้นผิวการสึกหรอและเศษการสึกหรอ

เบญจวรรณ แสงวิเชียร และชาวสวน กาญจนโมทย์ (2551) ได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิผิวสัมผัสต่อพฤติกรรมการสึกหรอของการฉีดขึ้นรูปโลหะผง (MIM) 316L ความพรุน 2% และ 6% เปรียบเทียบกับวัสดุที่ขึ้นรูปด้วยวิธีทางกล (wrought) 316L โดยขึ้นทดสอบแบบงานผลิตจาก wrought 316L และขึ้นทดสอบแบบหมุดถูกขึ้นรูปด้วยวิธีการกัดเซาะโลหะด้วยตัวนำไฟฟ้า (EDM) ซึ่งแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ wrought 316L และ MIM 316L ความพรุน 2% และ 6% ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติทางกายภาพและทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม MIM 316L และ wrought 316L

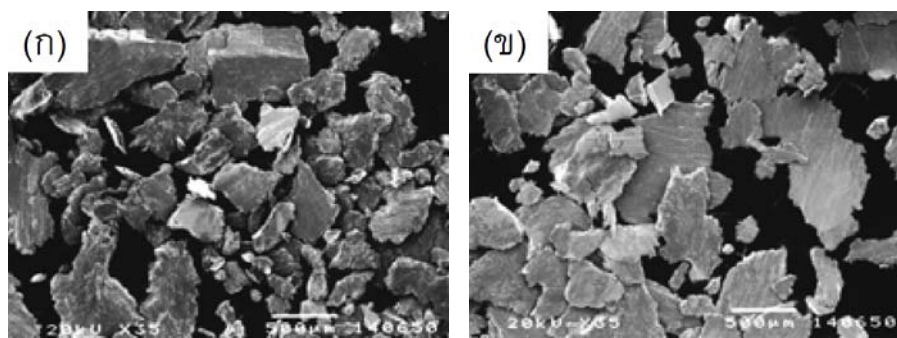
รูปที่ 2.12 และ 2.13 แสดงภาพถ่ายอิเล็กตรอนพื้นผิวการสึกหรอและเศษการสึกหรอ หลังจากสิ้นสุดการทดสอบที่ระยะไถล 2 กิโลเมตร พบว่า ที่ความเร็วการไถล 0.2 เมตรต่อวินาที พื้นผิวการสึกหรอแสดงลักษณะ shear tongue และบริเวณพื้นผิวรอบๆแสดงร่องรอยการเปลี่ยนรูปถาวร ดังรูปที่ 2.12 (ก) ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของกลไกการสึกหรอแบบยึดติด (adhesive wear) โดยการแนบติดจะเกิดบริเวณรอยต่อระหว่างผิวสัมผัส การเคลื่อนที่ทำให้เกิดแรงดึงส่วนที่อ่อนแอบริเวณใต้ผิวการสึกหรอนี้จะหลุดออกจากกัน กลายเป็นเศษการสึกหรอในลักษณะแผ่นหนา ดังแสดงในรูป 2.13 (ก) ในขณะที่ความเร็วการไถล 2.0 เมตรต่อวินาที พื้นผิวการสึกหรอแสดงลักษณะร่องละเอียด (groove) ขนานตามทิศทางการเคลื่อนที่ไถลดังรูปที่ 2.12 (ข) ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของการสึกหรอแบบขัดถู (abrasive wear) ที่เกิดจากพื้นผิวที่แข็งกว่าของชิ้นทดสอบแบบงานขัดถูบนพื้นผิวที่อ่อนกว่าของชิ้นทดสอบแบบหมุดการขัดถูทำให้เกิดแรงดึงและครูดส่วนที่อ่อนแอขาดจากกัน ส่งผลให้เกิดเศษการสึกหรอในลักษณะแผ่นบางดังแสดงในรูป 2.13 (ข)

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพและทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม MIM 316L และ wrought 316L
(เบญจวรรณ แสงวิเชียร และชาวสวน กาญจโนมัย, 2551)

Material	Tensile Strength (Mpa)	Yield Strength (Mpa)	Elongation (%)	Hardness (HV 10)	Density (kg/m ³)
MIM 316L	526	219	80	98 (2% porosity) 95 (6% porosity)	7.47
Wrought 316L (AISI 316L)	552	250	80	250 (disc) 140 (pin)	7.95



รูปที่ 2.12 ภาพถ่ายอิเล็กตรอนพื้นผิวการสึกหรอของชิ้นทดสอบแบบหมุน MIM 316L (ความพรุน 2%) ที่ระยะไกล 2 กิโลเมตรและความเร็วการไกล (ก) 0.2 เมตรต่อวินาที และ (ข) 2.0 เมตรต่อวินาที (เบญจวรรณ แสงวิเชียร และชาวสวน กาญจโนมัย, 2551)



รูปที่ 2.13 ภาพถ่ายอิเล็กตรอนเศษการสึกหรอของชิ้นทดสอบแบบหมุด MIM 316L (ความพรุน 2%) ที่ระยะไกล 2 กิโลเมตร และความเร็วการไกล (ก) 0.2 เมตรต่อวินาที และ (ข) 2.0 เมตรต่อวินาที (เบญจวรรณ แสงวิเชียร และชาวสวน กาญจนมัย, 2551)

(Linhu Tang, Chengxiu Gao, Jianlong Huang, Hongyan Zhang, Wenchang, 2013) ได้ การศึกษาอิทธิพลความแข็งและความเร็วในการไกลที่ส่งผลกับกลไกการสึกหรอของเหล็กกล้า เครื่องมือชุบแข็ง AISI D2 ทดสอบด้วยบอลอลอนดีสก์ บอลทำมาจาก Si_3N_4 และแผ่นจานทำจาก เหล็กกล้าเครื่องมือเย็นที่ผ่านการชุบแข็งมีค่าความแข็ง 51 ± 1 55 ± 1 58 ± 1 62 ± 1 และ 65 ± 1 HRC ความเร็วในการไกล 0.05 0.10 และ 0.50 เมตรต่อวินาที และแรงกด 5 นิวตัน พบว่าอัตราการ สึกหรอลดลงเมื่อค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ทดสอบด้วยความเร็ว 0.05 0.10 และ 0.50 เมตรต่อ วินาที และอัตราการสึกหรอของชิ้นงานที่มีค่าความแข็ง 65 HRC จะสูงที่สุดเมื่อทดสอบที่ความเร็ว 0.1 และ 0.5 เมตรต่อวินาที

ปัจจัยที่ทำให้กลไกการสึกหรอแตกต่างกันขึ้นอยู่กับ วัสดุคู่สัมผัส อุณหภูมิผิวชิ้นงาน ความ สะอาด ปริมาณสารหล่อลื่น ความเร็วในการไกล ดังนั้นสามารถลดหรือป้องกันการสึกหรอได้โดย การพิจารณาถึง

1. การเลือกใช้วัสดุ วัสดุที่เหมาะสมต้องมีคุณสมบัติต้านทานการสึกหรอต่อกลไกการสึก หรอในภาวะการใช้งานจริงได้มากที่สุด
2. การออกแบบ เป็นการออกแบบชิ้นงานให้มีการสึกหรอน้อยที่สุด เช่น มุมหรือความ โค้งของระบบท่อ การลดพื้นที่สัมผัสของวัสดุที่เสียดสีกัน การออกแบบเพื่อลดปริมาณ อนุภาคขี้ดูล เป็นต้น
3. การควบคุมภาวะการใช้งาน เกี่ยวข้องกับสภาวะการใช้งานที่มีผลต่ออัตราการสึกหรอ เช่น ความเป็นกรดด่าง ความร้อน การสั่นสะเทือนที่ผิวสัมผัส เป็นต้น การปรับหรือ

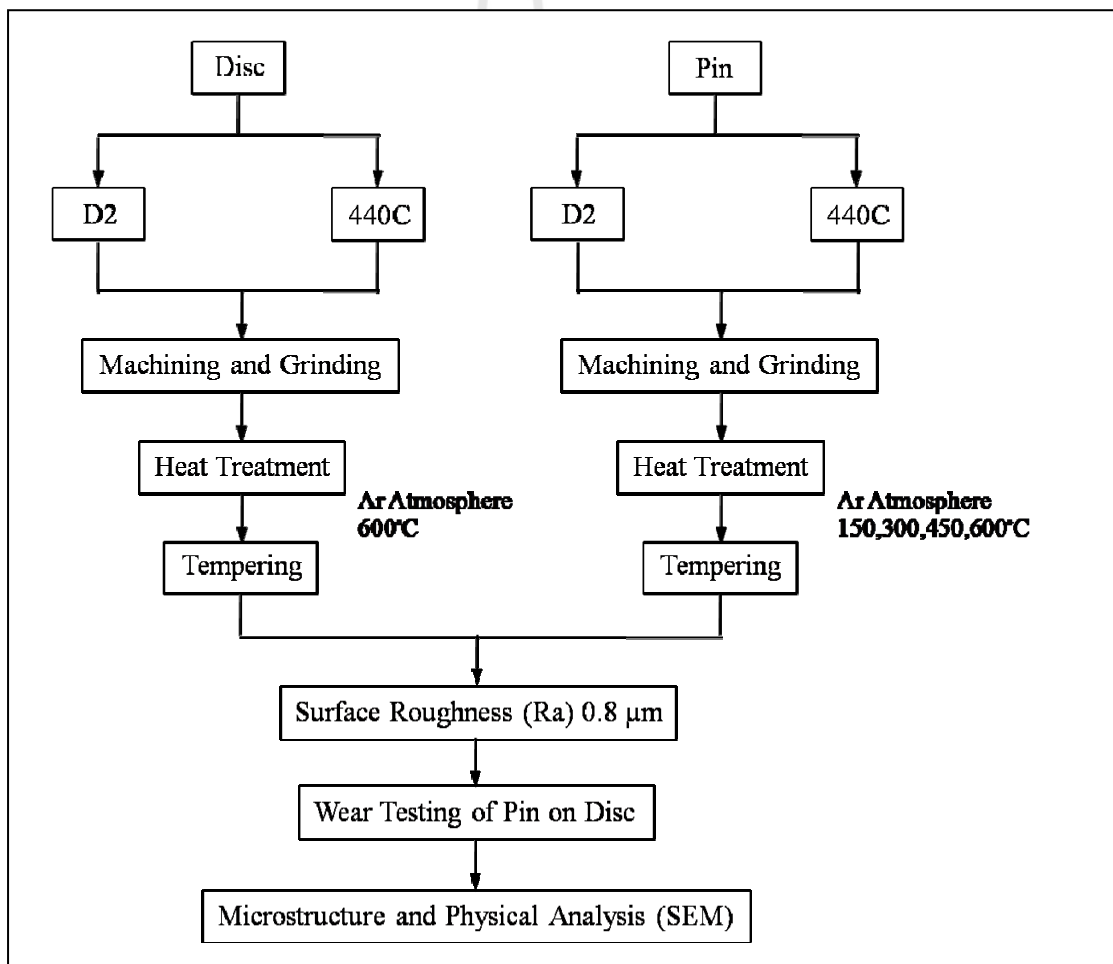
ควบคุมภาวะการใช้งานดังกล่าวจะช่วยลดอัตราการสึกหรอได้(ดร.ปนัดดา นิรนาทกล้า
พงส์ และคณะ, 2004)

ทั้งนี้ในงานวิจัยได้ศึกษาสมบัติความต้านทานการสึกหรอของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 และเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค 440C ซึ่งขึ้นรูปเป็นแผ่นงานและหมุด โดยแผ่นงานมีลักษณะ ทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร หนา 5 มิลลิเมตร ส่วนหมุดมีรูปร่างเป็น ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตร โดยชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น ถูกนำไปชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1020 องศาเซลเซียส ด้วยการปล่อยเย็นตัวในอากาศแล้วนำแผ่นงานไป อบคืนไฟที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ส่วนหมุดนำไปอบคืนไฟที่อุณหภูมิ 150 300 450 และ 600 องศาเซลเซียส สำหรับกรณีชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติคชิ้นงานทั้งหมดถูกนำไปชุบแข็งที่ อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส แล้วนำแผ่นงานไปอบคืนไฟที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ส่วนหมุด นำไปอบคืนไฟที่อุณหภูมิ 150 300 450 และ 600 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงนำชิ้นงานทั้งหมดไป เตรียมผิวจนมีความหยาบผิวประมาณ 0.8 ไมครอน และทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่องทดสอบ ฟินออนดิสก์ โดยทดสอบที่แรงกด 10 และ 50 นิวตัน จากนั้นจึงตรวจสอบน้ำหนักที่สูญเสียไป ตรวจสอบผิวชิ้นงานภายหลังจากการทดสอบการสึกหรอด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราด ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและค่าความแข็ง จากนั้นจึงหาอัตราการสึกหรอได้จากการสร้าง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียไปภายหลังจากการทดสอบของชิ้นงานกับระยะทางที่ ทดสอบในแต่ละรอบของการทดสอบ

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการทดลอง ที่ใช้ในการศึกษาอัตราการสึกหรอของเหล็กกล้า เครื่องมืองานเย็นและเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดมาร์เทนซิติค และความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคกับอัตราการสึกหรอของเหล็กกล้าทั้งสองชนิดภายหลังการชุบแข็งและการอบคืนไฟ มีรายละเอียดโดยภาพรวมซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพระเบียบวิธีการทำวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

เหล็กกล้าที่ใช้ในการศึกษาเป็นเหล็กกล้าเจือสูง 2 ชั้นคุณภาพ ได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 440C และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น AISI D2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็นแสดงในตารางที่ 3.1 ส่วนค่าความแข็งในสภาพก่อนอบชุบทางความร้อนแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น

โลหะ	ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)						
	%C	%Cr	%V	%Mo	%Si	%Mn	%Fe
440C(Disc)	1.35	15.91	0.06	0.45	0.43	0.48	Bal.
440C(Pin)	1.23	15.74	0.06	0.30	0.21	0.85	Bal.
D2(Disc)	1.48	11.96	0.24	0.85	0.17	0.32	Bal.
D2(Pin)	1.53	11.72	0.41	0.85	0.26	0.35	Bal.

ตารางที่ 3.2 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น ก่อนอบชุบทางความร้อน

โลหะ	ความแข็ง (HRC)			
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
440C (As-received)(Disc)	19.50	18.20	19.30	19.00
440C (As-received)(Pin)	21.10	21.00	21.50	21.20
D2 (As-received)(Disc)	20.10	20.60	19.40	20.03
D2 (As-received)(Pin)	14.70	14.50	15.00	14.73

3.1.2 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยสามารถแบ่งออกตามขั้นตอนของการวิจัยได้ดังในหัวข้อ 3.1.2.1-3.1.2.6 ส่วนรูปแสดงเครื่องมือและอุปกรณ์แสดงในรูปที่ 3.4

3.1.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับเตรียมชิ้นงานก่อนอบชุบ

- เลื่อยวงเดือนกึ่งอัตโนมัติ
- เครื่องเจาะชิ้นงาน
- เครื่องกลึง
- เครื่องทดสอบส่วนผสมทางเคมีของโลหะ SPECTROLAB

3.1.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับเตรียมชิ้นงานในระหว่างอบชุบ

- เตาเผาแบบท่อ (Tube Furnace)
- แก๊สอาร์กอน และ Flow Meter

3.1.2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับเตรียมผิวชิ้นงานก่อนการทดสอบการสึกหรอ

- เครื่องเจียรนัยราบ
- เครื่องขัดชิ้นงานแบบหมุน
- กระดาษทรายน้ำเบอร์ 100 320 400 600 800 1000 และ 1200
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสงสะท้อน
- เครื่องล้างความถี่สูงอัลตราโซนิค
- เครื่องซั่ง 4 ตำแหน่ง
- อุปกรณ์ซั่งน้ำหนักในน้ำ

3.1.2.4 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับวัด,ทดสอบสมบัติเชิงกลและทดสอบการสึกหรอ

- เวอร์เนียคาลิเปอร์
- เครื่องวัดความหยาบผิวแบบใช้แสง
- เครื่องทดสอบความแข็งมหภาคแบบวิกเกอร์
- เครื่องมือทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิสก์ (Pin on Disc)

3.1.2.5 เครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบรูปแบบความเสียหายทางกายภาพ

- กล้องจุลทรรศน์ใช้แสงแบบสเตอริโอ Stereoscopic Microscope
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM/EDX)

3.1.2.6 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน

- เมทิลแอลกอฮอล์
- อะซิโตน
- เม็ดซิลิกาเจลสำหรับดูดความชื้นให้กับชิ้นงาน
- ไนโตรเจนเหลว



(ก) เครื่องทดสอบส่วนผสมทางเคมีของโลหะ
SPECTROLAB



(ข) เครื่องกลึง



(ค) เครื่องกลึง



(ง) เครื่องเจาะ



(จ) เครื่องเจียรนัยแนวราบ



(ฉ) เครื่องเจียรนัยเพลากลม

รูปที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย



(ข) เครื่องล้างเตี๋นกึ่งอัตโนมัติ



(ค) เต้าเผาแบบท่อ



(ง) เครื่องวัดชิ้นงานแบบหมุน



(ฉ) กระดาษทรายเบอร์ต่างๆ



(ค) เครื่องล้างความถี่สูงอุลตราโซนิก



(ค) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง



(ค) อุปกรณ์ชั่งน้ำหนักในน้ำ



(ค) เครื่องวัดความหยาบผิวแบบใช้แสง

รูปที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย (ต่อ)



(ค) เครื่องทดสอบความแข็งแรงมหภาค
แบบวิกเกอร์ส



(ณ) กล้องจุลทรรศน์ใช้แสงแบบสเตอริโอ
Stereoscopic Microscope



(ค) เครื่องมือทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิสก์ (Pin on Disc)

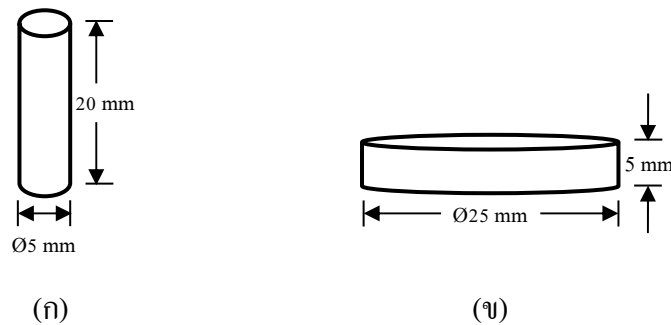
รูปที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย (ต่อ)

3.2 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้แบ่งขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยเป็น 5 ขั้นตอนดังนี้คือ

3.2.1 การเตรียมชิ้นงาน

นำเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 440C และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น AISI D2 ตัดและขึ้นรูปให้เป็นรูปทรง 2 แบบเรียกว่าหมุด (Pin) และแผ่นจาน (Disc) โดยหมุดมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตร ส่วนแผ่นจานมีลักษณะทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร หนา 5 มิลลิเมตร ดังในรูปที่ 3.3



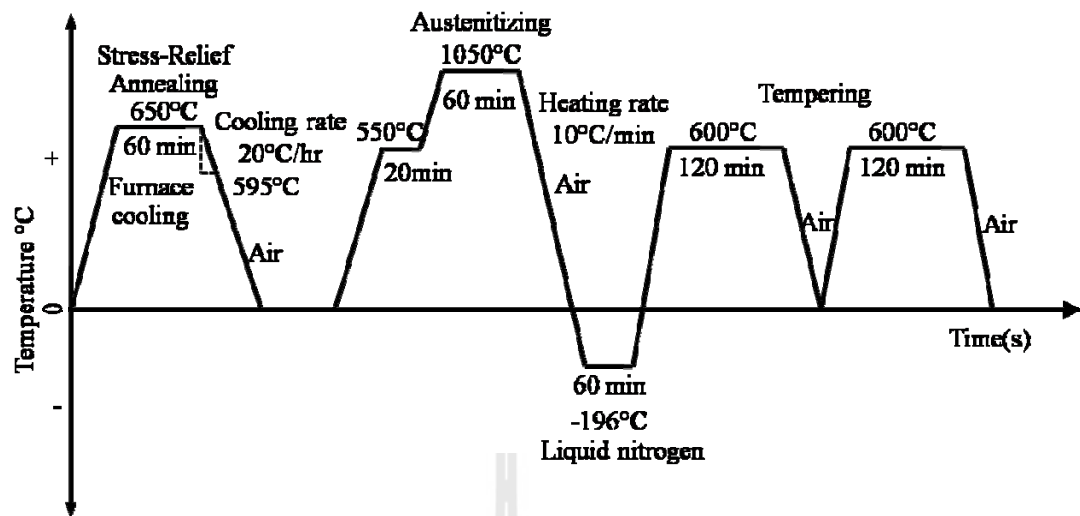
รูปที่ 3.3 ชิ้นงานที่ตัดขึ้นรูป (ก) หมุด (Pin) และ (ข) แผ่นจาน (Disc)

3.2.2 การอบชุบทางความร้อน

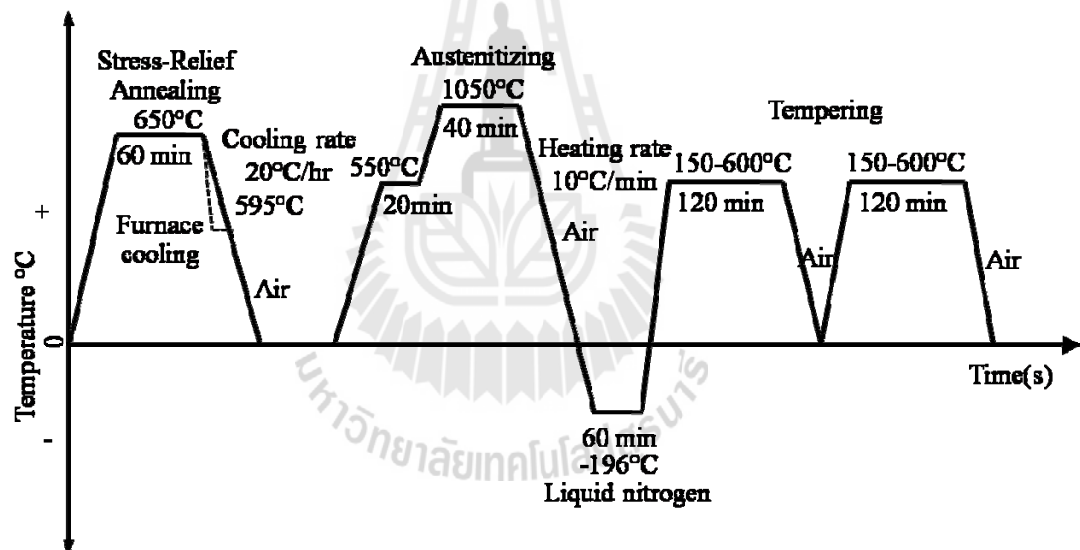
นำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปตามขนาดที่ต้องการแล้ว ไปชุบแข็งและอบคืนไฟ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งประกอบไปด้วยรายละเอียดดังนี้

3.2.2.1 การชุบแข็งเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 440C แสดงในรูปที่ 3.4

- นำแผ่นจานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 440C ไปอบคลายความเค้น ตกค้าง (Stress-Relief Annealing) ในเตาเผาแบบ ท่อ ซึ่งบรรยากาศในเตาเป็นอาร์กอน โดยอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 60 นาที จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในเตาจนถึงอุณหภูมิ 595 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเย็นตัว 20 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง จากนั้นจึงปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
- นำแผ่นจานไปอุ่นให้ร้อนที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
- อบแผ่นจานที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 60 นาที จากนั้นนำมาเย็นตัวในอากาศ เมื่ออุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องจึงนำมาชุบด้วยไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) เป็นระยะเวลา 60 นาที
- นำแผ่นจานไปอบคืนไฟ (Tempering) 2 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาครั้งละ 120 นาที และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
- อบชุบชิ้นงานหมุด (pin) เช่นเดียวกับแผ่นจาน แต่ใช้อุณหภูมิอบคืนไฟ 150 300 450 และ 600 องศาเซลเซียสดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.4 การชุบแข็งเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AISI 440C
(ก) แผ่นจาน (disc) และ (ข) หมุด (pin)

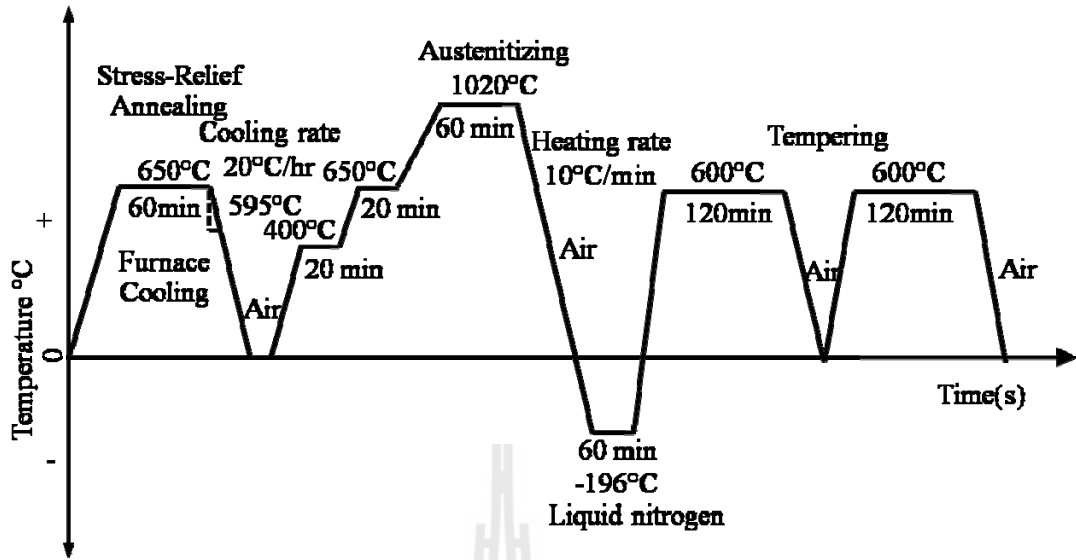
3.2.2.2 การชุบแข็งเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2

- นำชิ้นงานแผ่นจานเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ที่ผ่านการขึ้นรูปแบบจาน (Disc) ไปทำการอบคลายตัว (Stress-Relief Annealing) ซึ่งบรรยากาศในเตาเป็นอาร์กอน โดยอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็น

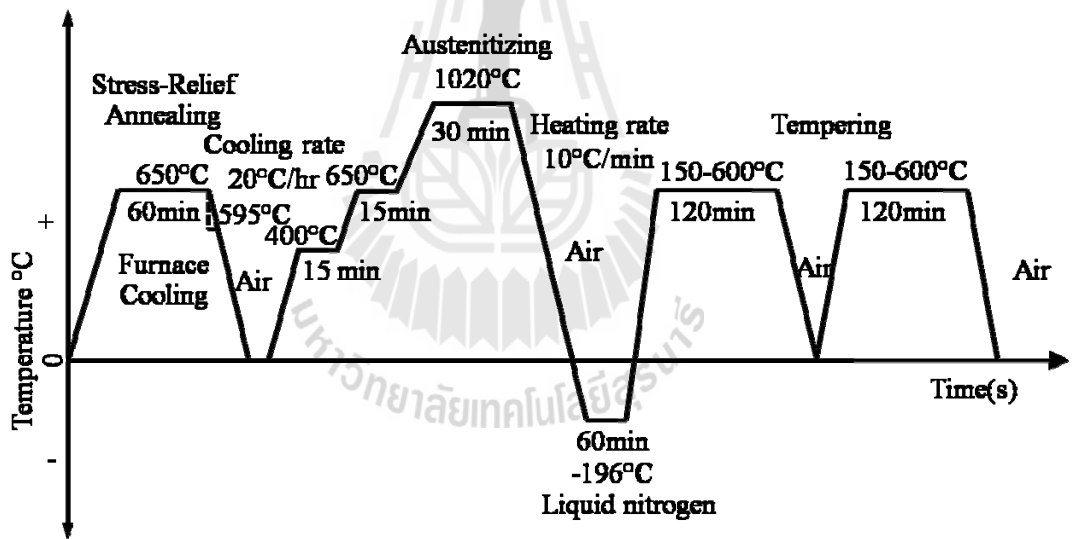
ระยะเวลา 60 นาที จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในเตาจนถึงอุณหภูมิ 595 องศาเซลเซียส โดยอัตราการเย็นตัว 20 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง จากนั้นจึงนำมาเย็นตัวในอากาศ

- นำงานไปอุ่นให้ร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 20 นาที จากนั้นนำไปเพิ่มอุณหภูมิต่อไปที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ 20 นาที
- อบแผ่นงานต่อไปจนถึงอุณหภูมิ 1020 องศาเซลเซียสด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งเป็นการทำอสเตนไนต์ซิง และทิ้งไว้ 60 นาที จากนั้นจึงปล่อยให้เย็นตัวในอากาศจนถึงอุณหภูมิห้อง และนำไปชุบด้วยไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) เป็นระยะเวลา 60 นาที
- นำแผ่นงานไปอบคืนไฟ 2 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ครั้งละ 120 นาที จากนั้นจึงปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
- อบชุบชิ้นงานหมด (pin) เช่นเดียวกับแผ่นงาน แต่อุณหภูมิที่ใช้แสดงดังภาพที่ 3.5 (ข) กำหนดชื่อชิ้นงานหมดดังแสดงในตารางที่ 3.3





(ก)



(ข)

รูปที่ 3.5 การชุบแข็งเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น AISI D2

(ก)แผ่นจาน (disc) และ (ข) หมุด (pin)

ตารางที่ 3.3 สภาวะในการอบคืนไฟของหมุดที่ใช้ในการทดสอบและการกำหนดชื่อเรียกตัวอย่าง
ของคู่มือการทดสอบ

ชื่อตัวอย่างชิ้นงาน	ชนิดวัสดุ	อุณหภูมิการอบคืนไฟ (°C)
S-T150	เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 440C	150
S-T300	เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 440C	300
S-T450	เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 440C	450
S-T600	เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 440C	600
D-T150	เหล็กกล้าเครื่องมือเย็น AISI D2	150
D-T300	เหล็กกล้าเครื่องมือเย็น AISI D2	300
D-T450	เหล็กกล้าเครื่องมือเย็น AISI D2	450
D-T600	เหล็กกล้าเครื่องมือเย็น AISI D2	600

3.2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

นำชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแล้ว ขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 320 400 600 800 1000 และ 1200 และขัดละเอียดด้วยผ้าสักหลาด และเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติกใช้น้ำยากัดกรด Viella's และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ใช้น้ำยากัดกรด Nital 10% จากนั้นจึงวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงสะท้อน (Optical Microscope)

3.2.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลและการทดสอบการสึกหรอ

3.2.4.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบการสึกหรอ

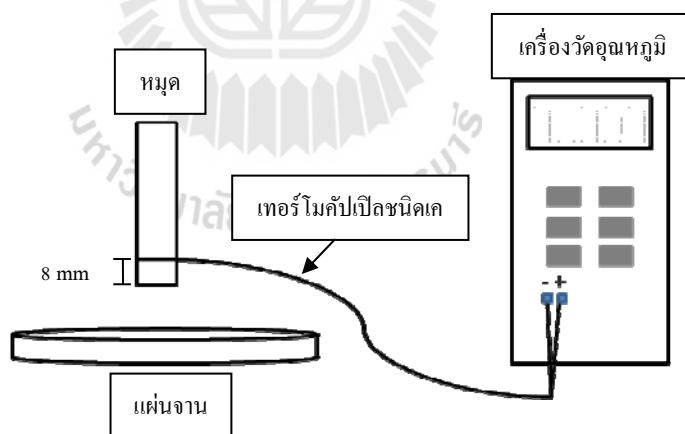
- เตรียมผิวหน้าของแผ่นงานและหมุดให้มีความหยาบผิว (Ra) 0.8 ไมครอน โดยการใช้อุปกรณ์เจียรนัยราบ เจียรที่ผิวหน้าของแผ่นงานและนำแผ่นงานและหมุดไปขัดด้วยเครื่องขัดกระดาษทรายเบอร์ 100 320 400 600 800 1000 และ 1200
- ทำความสะอาดชิ้นงานทั้งหมดด้วยสารละลายอะซิโตน โดยใช้เครื่องล้างความถี่สูงอัลตราโซนิคเป็นเวลา 20 นาที
- นำชิ้นงานทั้งหมดซึ่งน้ำหนักในอากาศ และชั่งน้ำหนักในน้ำ ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบ 4 ตำแหน่ง พร้อมบันทึกค่า

3.2.4.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล

- วัดความแข็งของชิ้นงานด้วยเครื่องวัดความแข็งมหภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้น้ำหนักกด 98.7 นิวตันและใช้ระยะเวลาในการกด 10 วินาที
- วัดความหยาบผิวของชิ้นงานด้วยเครื่องวัดความหยาบผิวแบบใช้แสงยี่ห้อ VEEGO INSTRUMENT INC.

3.2.4.3 การทดสอบการสึกหรอ

การทดสอบการสึกหรอแบบไถลในสภาวะไร้สารหล่อลื่น (dry sliding condition) กระทำโดยใช้ชุดทดสอบแบบพินออนดิสก์ (Phoenix Tribology : T88) วิธีการทดสอบอ้างอิงมาตรฐาน ASTM G99 ทดสอบภายใต้แรงกด 10 นิวตัน และ 50 นิวตัน เป็นระยะทาง 1000 เมตร และมีการหยุดเพื่อชั่งน้ำหนักและวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิดเคทีที่ทดสอบด้วยระยะ 200 400 600 800 และ 1000 เมตร แรงเสียดทานถูกบันทึกค่าอย่างต่อเนื่องตลอดการทดสอบด้วยโหลดเซลล์ (load cell) วิธีการวัดอุณหภูมิแสดงในรูปที่ 3.6 จากนั้นนำหมุดและแผ่นจานที่ผ่านการทดสอบ ไปชั่งน้ำหนัก



รูปที่ 3.6 วิธีการวัดอุณหภูมิในขณะทดสอบการสึกหรอ

3.2.5 การวิเคราะห์ความเสียหายทางกายภาพ

3.2.5.1 นำหมุดและแผ่นงานที่ผ่านการทดสอบด้วยเครื่องพินออนดิสก์แล้ว ไปวิเคราะห์การสึกหรอซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณเนื้อวัสดุที่สูญหายไป ด้วยสมการ

$$\text{Volume loss, } mm^3 = \frac{\text{mass loss, } g}{\text{density, } g / cm^3} \times 1000 \quad (3.1)$$

ในการหาอัตราการสึกหรอต้องพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักที่สูญหายไปหลังจากการทดสอบของชิ้นงานกับระยะทางที่ทดสอบในแต่ละรอบของการทดสอบ ซึ่งวิธีหาความสัมพันธ์ของเส้นตรงสามารถหาได้จาก สมการที่ 2

$$W_l = w_r \cdot x + C \quad (3.2)$$

โดย W_l คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่สูญเสียบนหลังการทดสอบ (mg)
 x คือ ระยะทางทั้งหมดที่ทดสอบการสึกหรอ (m)
 w_r คือ อัตราการสึกหรอ ($\frac{mg}{m}$)
 C คือ ค่าคงที่สมการเส้นตรง

3.2.5.2 การวิเคราะห์ความเสียหายทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ใช้แสง แบบสเตอริโอ Stereoscopic Microscope และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

บทที่ 4

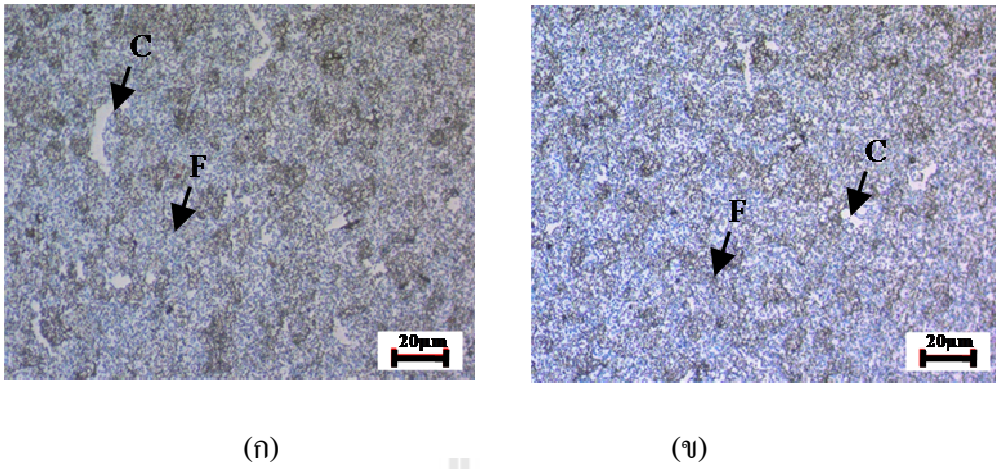
ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 บทนำ

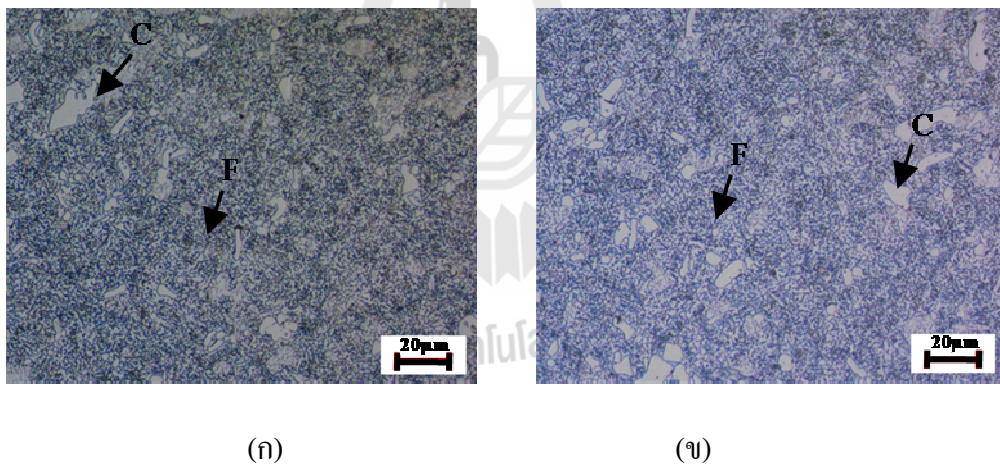
โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิดิก AISI 440C และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ก่อนการอบชุบทางความร้อน ประกอบด้วยเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และคาร์ไบด์ (Carbide) ซึ่งโครงสร้างจุลภาคแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ลักษณะโครงสร้างดังกล่าวเหมาะสมกับการนำชิ้นงานไปขึ้นรูปด้วยการกลึงไสตัดเจาะ เพราะเฟอร์ไรต์ค่อนข้างอ่อนนุ่ม แต่โครงสร้างจุลภาคนี้ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานได้เลยทันที จำเป็นต้องปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กที่ผ่านการผลิตต่างๆ มาก่อน ในงานวิจัยนี้จึงได้ชุบแข็งและอบคืนไฟเหล็กกล้าทั้งสองประเภทแล้วนำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสง (Optical microscope) ทดสอบค่าความแข็ง ทดสอบความต้านทานการสึกหรอด้วยเครื่องพินอินดิคเตอร์และวิเคราะห์ความเสียหายทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสามมิติ (Stereo Microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีดังนี้

4.2 โครงสร้างจุลภาคหลังการอบคืนไฟ

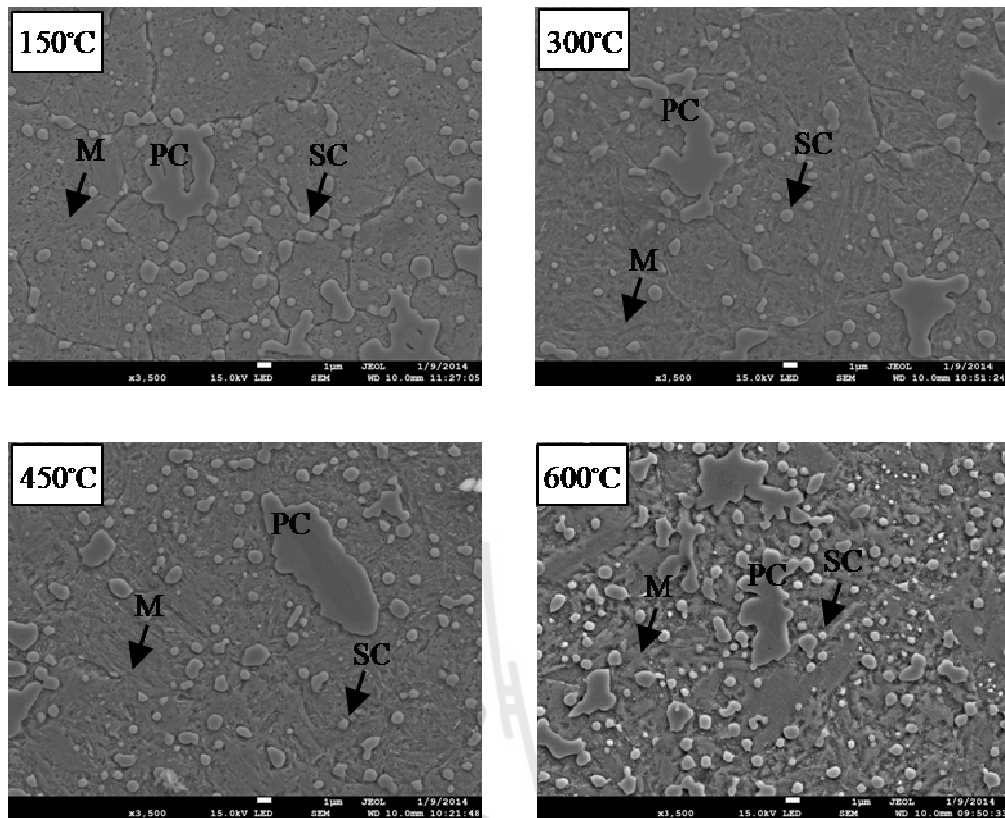
โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิดิก 440C และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ที่ได้ภายหลังจากการอบคืนไฟมีลักษณะคล้ายกันซึ่งประกอบด้วย คาร์ไบด์ปฐมภูมิ (Primary Carbide) คาร์ไบด์ทุติยภูมิ (Secondary Carbide) และเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ (Tempered Martensite) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 การอบคืนไฟที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสส่งผลให้เริ่มเกิดคาร์ไบด์ทุติยภูมิขนาดเล็กกระจายทั่วไปในโครงสร้างเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ การอบคืนไฟที่ 300 องศาเซลเซียสก็ทำให้เกิดคาร์ไบด์ทุติยภูมิขนาดเล็กกระจายเพิ่มมากขึ้น การอบคืนไฟที่ 450 องศาเซลเซียสเกิดการตกผลึกของคาร์ไบด์ทุติยภูมิอย่างกระจาย โดยปริมาณคาร์ไบด์เกิดขึ้นมากพอสมควรจนสังเกตเห็นได้มากจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ส่วนการอบคืนไฟที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เกิดการตกผลึกของคาร์ไบด์ทุติยภูมิมากและมีขนาดใหญ่ จึงเห็นได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4



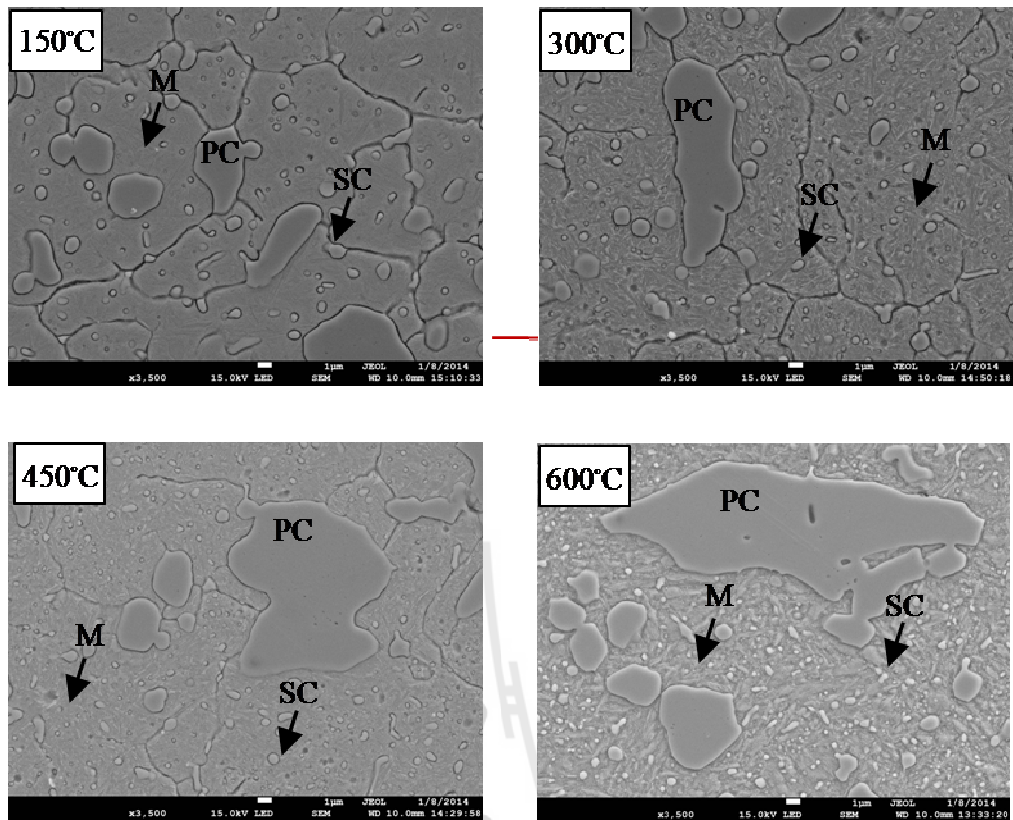
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 440C ในสภาพปกติ
 (ก) โครงสร้างจุลภาคของแผ่นงาน (ข) โครงสร้างจุลภาคของหมุด
 (F คือเฟอร์ไรต์ และ C คือ คาร์ไบด์)



รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ในสภาพปกติ
 (ก) โครงสร้างจุลภาคของแผ่นงาน (ข) โครงสร้างจุลภาคของหมุด
 (F คือเฟอร์ไรต์ และ C คือ คาร์ไบด์)



รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค 440C ที่กลิ้งไสเป็นหมุด
 ภายหลังจากอบคืนไฟ 150 300 450 และ 600 องศาเซลเซียส
 (M คือ มาร์เทนไซต์, PC คือ คาร์ไบด์ปฐมภูมิ และ SC คือ คาร์ไบด์ทุติยภูมิ)

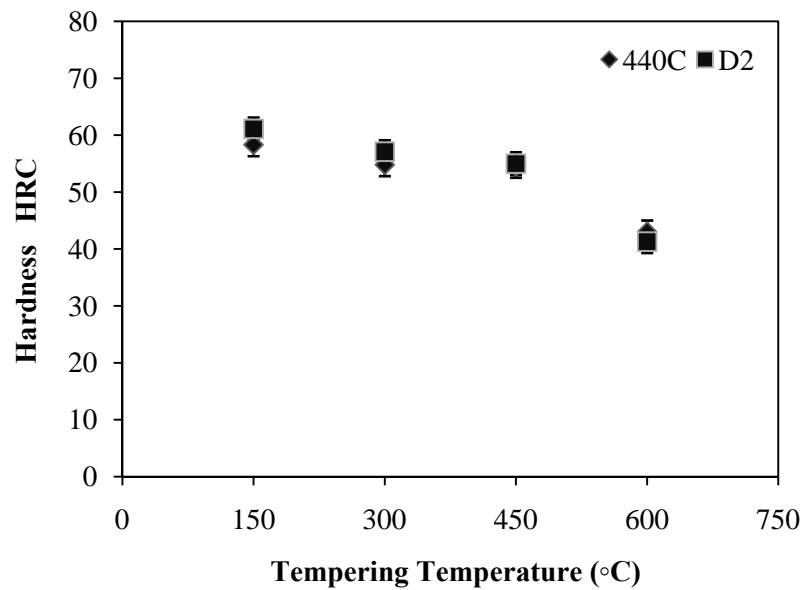


รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ที่กลึงไสเป็นหมด
 ภายหลังการอบคืนไฟ 150 300 450 และ 600 องศาเซลเซียส
 (M คือ มาร์เทนไซต์, PC คือ คาร์ไบด์ปฐมภูมิ และ SC คือ คาร์ไบด์ทุติยภูมิ)

4.3 ผลค่าความแข็ง

จากผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์สโดยใช้แรงที่เกิดจากน้ำหนักกด 10 กิโลกรัม ระยะเวลาในการกด 10 วินาที พบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค 440C ก่อนนำมากลึงไสเพื่อนำมาขึ้นรูปเป็นจานคือ 19.5 HRC ส่วนค่าความแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค 440C ก่อนนำมากลึงไสเพื่อนำมาขึ้นรูปเป็นหมุดคือ 21.1 HRC ค่าความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ก่อนนำมากลึงไสเพื่อนำมาขึ้นรูปเป็นจาน 20.1 HRC และค่าความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ก่อนนำมากลึงไสเพื่อนำมาขึ้นรูปเป็นหมุด 14.7 HRC แสดงดังในตารางที่ 4.1

ภายหลังจากการนำเหล็กกล้าทั้งสองชนิดไปชุบแข็งและอบคืนไฟเป็นจำนวน 2 ครั้ง ที่ระยะเวลาการอบคืนไฟครั้งละ 2 ชั่วโมง อุณหภูมิอบคืนไฟเป็น 150 300 450 และ 600 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความแข็งที่วัดได้ทั้งหมดสูงขึ้นเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับชิ้นงานก่อนนำมาชุบแข็งและอบคืนไฟ และปริมาณของคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่เกิดขึ้นหลังอบคืนไฟที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าการอบคืนไฟที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดคาร์ไบด์ทุติยภูมิขนาดเล็ก และมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของการอบคืนไฟเป็น 300 450 และ 600 องศาเซลเซียส โดยที่ 600 องศาเซลเซียสคาร์ไบด์ทุติยภูมิมีปริมาณมาก ส่งผลให้ค่าความแข็งหลังอบคืนไฟ 2 ครั้งที่อุณหภูมินี้ลดต่ำลงอย่างชัดเจน ค่าความแข็งมีแนวโน้มต่ำลงเมื่ออุณหภูมิในการอบคืนไฟสูงขึ้น และเห็นปรากฏการณ์ secondary hardening เพียงเล็กน้อยที่อุณหภูมิการอบคืนไฟ 450 องศาเซลเซียสของเหล็กกล้าทั้งสองชนิด เนื่องจากชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค 440C และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ได้ผ่านการทำบัพเย็นด้วยการชุบเย็นในไนโตรเจนเหลว เพื่อทำให้ออสเตไนต์กลายเป็นมาร์เทนไซต์มากที่สุดก่อนการอบคืนไฟ ภายหลังจากการอบคืนไฟจึงเกิด secondary hardening เพียงเล็กน้อยอันเนื่องมาจากการตกผลึกของคาร์ไบด์ทุติยภูมิต่างกัน



รูปที่ 4.5 ค่าความแข็งเทียบกับอุณหภูมิในการอบคืนไฟของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิดิก 440C และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ของหมด

ตารางที่ 4.1 ค่าความแข็งเฉลี่ยของเหล็กกล้าทั้งสองประเภทภายหลังจากชุบแข็งและอบคืนไฟ

วัสดุ	ประเภทการขึ้นรูป	อุณหภูมิอบคืนไฟ (°C)	ค่าความแข็งเฉลี่ย (HRC)
เหล็กกล้าไร้สนิม มาร์เทนซิดิก 440C	Pin	150	58.3
		300	54.8
		450	54.5
		600	43.0
	Disc	600	39.8
เหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2	Pin	150	61.1
		300	57.1
		450	55.0
		600	41.3
	Disc	600	40.4

4.4 แรงเสียดทานกับระยะทางที่ทดสอบ

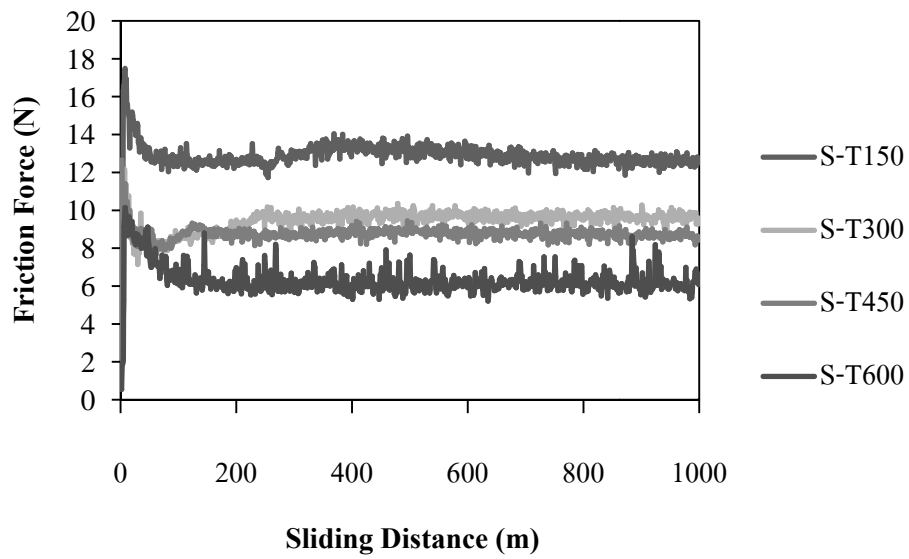
หลังจากเตรียมชิ้นงานและนำมาทดสอบความต้านทานการสึกหรอด้วยเครื่องทดสอบ ฟินออนดิสก์ โดยใช้แรงกด 10 นิวตัน ระยะทางที่ทดสอบ 1000 เมตร และแรงกด 50 นิวตัน ระยะทาง 800 เมตร ได้ผลดังนี้

4.4.1 แรงเสียดทานในกรณีการทดสอบด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 440C

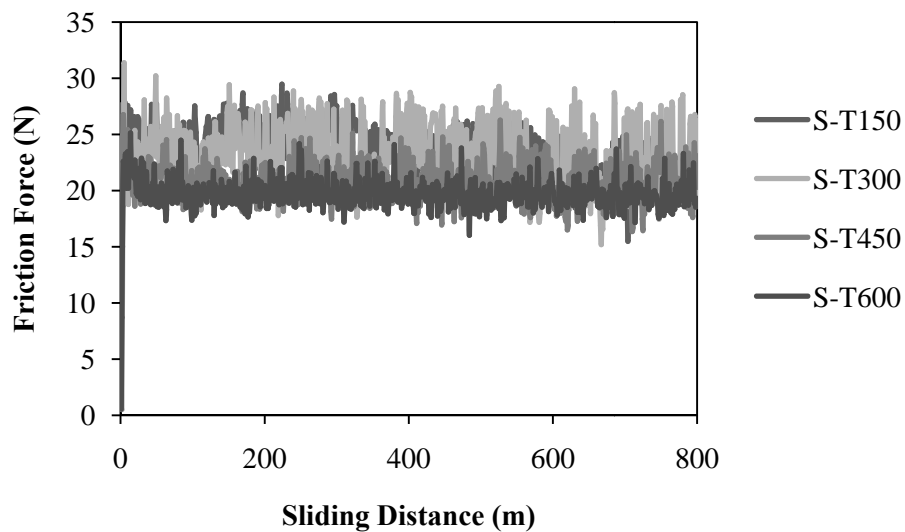
ในขณะที่ทดสอบการสึกหรอด้วยแรงกด 10 นิวตัน แรงเสียดทานมีค่าสูงในช่วง เริ่มต้นและลดลงเมื่อระยะการ ไถลเพิ่มมากขึ้น หลังจากนั้นแรงเสียดทานจะเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady State) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับระยะทางที่ทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งเห็นได้ว่าสำหรับกรณีที่หมุนผ่านการอบคืนไฟที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เส้นกราฟของแรงเสียดทานอยู่สูงเหนือเส้นการอบคืนไฟที่อุณหภูมิอื่นๆ แสดงให้เห็นว่าค่าแรงเสียดทานของกลุ่มการทดสอบนี้สูงกว่ากลุ่มการทดสอบที่หมุนผ่านการอบคืนไฟด้วยอุณหภูมิ 300 450 และ 600 องศาเซลเซียส

ในช่วงที่เส้นกราฟเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว พบว่าแรงเสียดทานสูงที่สุดของแต่ละกลุ่ม การทดสอบที่หมุนผ่านการอบคืนไฟ 150 300 450 และ 600 องศาเซลเซียส อยู่ที่ 12.91 9.86 8.96 และ 6.28 นิวตัน ตามลำดับ หมุดที่ผ่านการอบคืนไฟ 150 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งสูงที่สุดคือ 58.3 HRC และกลุ่มการทดสอบที่ใช้หมุดนี้ให้แรงเสียดทานสูงที่สุด รองลงมาคือกลุ่มการทดสอบของ หมุดที่ผ่านการอบคืนไฟ 300 450 และ 600 องศาเซลเซียสที่มีแรงเสียดทานต่ำที่สุด ดังแสดงใน ตารางที่ 4.2

ในการทดสอบการสึกหรอด้วยแรงกด 50 นิวตัน พบว่าค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น สูงที่สุดของแต่ละกลุ่มการทดสอบที่หมุนผ่านการอบคืนไฟ 150 300 450 และ 600 องศาเซลเซียสอยู่ที่ 23.31 23.11 20.86 และ 19.75 นิวตัน ลักษณะของการแกว่งตัวของเส้นกราฟ (amplitude) มี จุดสูงสุดและต่ำสุดที่มากกว่าการทดสอบด้วยแรงกด 10 นิวตัน เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่าความ แข็งพบว่าชิ้นงานที่มีค่าความแข็งสูงภายหลังจากการทดสอบ มีค่าแรงเสียดทานสูงที่สุด และ แนวโน้มของแรงเสียดทานลดลงตามอุณหภูมิในการอบคืนไฟที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับระยะทางที่ทดสอบชิ้นงาน
เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 440C ที่แรงกด 10 นิวตัน



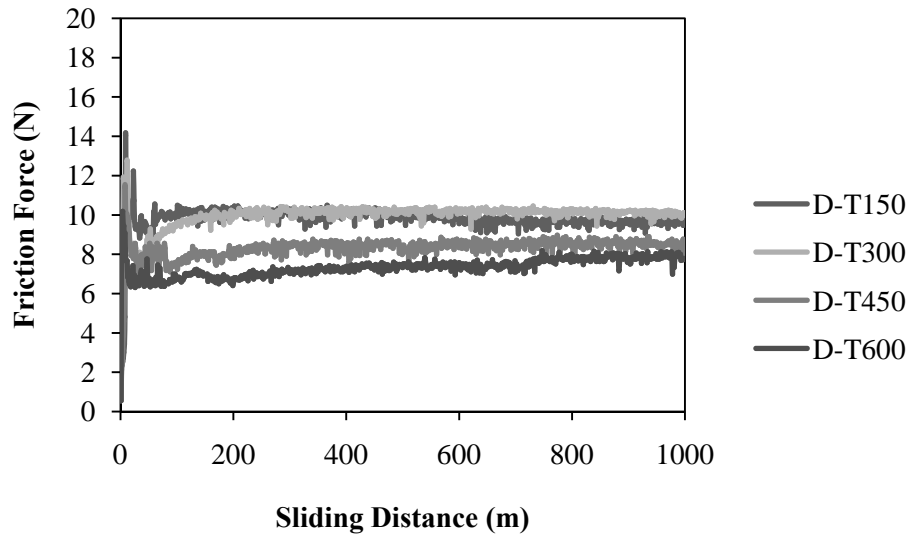
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับระยะทางที่ทดสอบชิ้นงาน
เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 440C ที่แรงกด 50 นิวตัน

4.4.2 แรงเสียดทานในกรณีทดสอบด้วยเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2

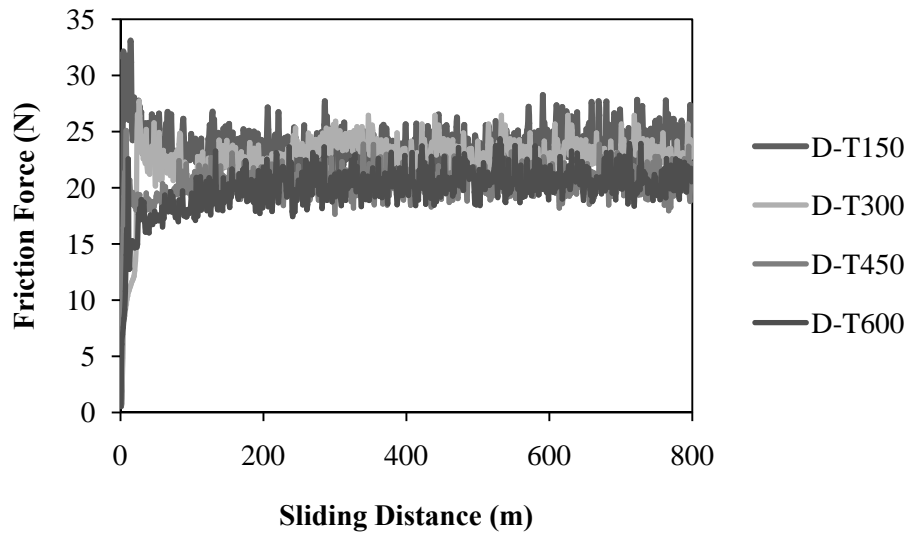
ผลการทดสอบการสึกหรอของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็นด้วยแรงกด 10 นิวตันแสดงในรูปที่ 4.10 โดยพบว่าแรงเสียดทานของคู่การทดสอบที่หมุนผ่านการอบคืนไฟ 150 องศาเซลเซียส มีเส้นกราฟที่สูงขึ้นในช่วงแรก และเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวเส้นกราฟมีลักษณะลดลงเล็กน้อย ซึ่งงานของคู่การทดสอบที่หมุนผ่านการอบคืนไฟ 300 450 และ 600 องศาเซลเซียสในช่วงแรกเส้นกราฟจะสูงขึ้น และค่อยๆ ลดลงจนเข้าสู่สภาวะคงตัวเช่นกัน นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่าที่ระยะทางในการทดสอบ 200 เมตร เส้นกราฟของคู่การทดสอบที่หมุนผ่านการอบคืนไฟที่ 300 องศาเซลเซียสสูงขึ้นเล็กน้อย และสูงเหนือเส้นคู่การทดสอบที่อบคืนไฟ 150 องศาเซลเซียส

การทดสอบที่แรงกด 50 นิวตัน พบว่าค่าแรงเสียดทานของคู่ทดสอบหมุนผ่านการอบคืนไฟที่ 150 องศาเซลเซียสมีค่าสูงที่สุดที่ 25 นิวตันรองลงมาคือคู่การทดสอบที่หมุนผ่านการอบคืนไฟที่ 300 450 และ 600 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งค่าแรงเสียดทานเฉลี่ยลดลงตามค่าความแข็งที่ลดลง

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าแรงเสียดทานจากการทดสอบด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม มาร์เทนซิติคกับเหล็กกล้าเครื่องมือเย็นทดสอบที่แรงกดเดียวกันทั้ง 10 และ 50 นิวตันพบว่า แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นกับเหล็กกล้าทั้งสองประเภทมีค่าใกล้เคียงกัน และค่าแรงเสียดทานลดลงตามอุณหภูมิอบคืนไฟของหมุดที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับระยะทางที่ทดสอบ
 ชั่งงานเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ที่แรงกด 10 นิวตัน



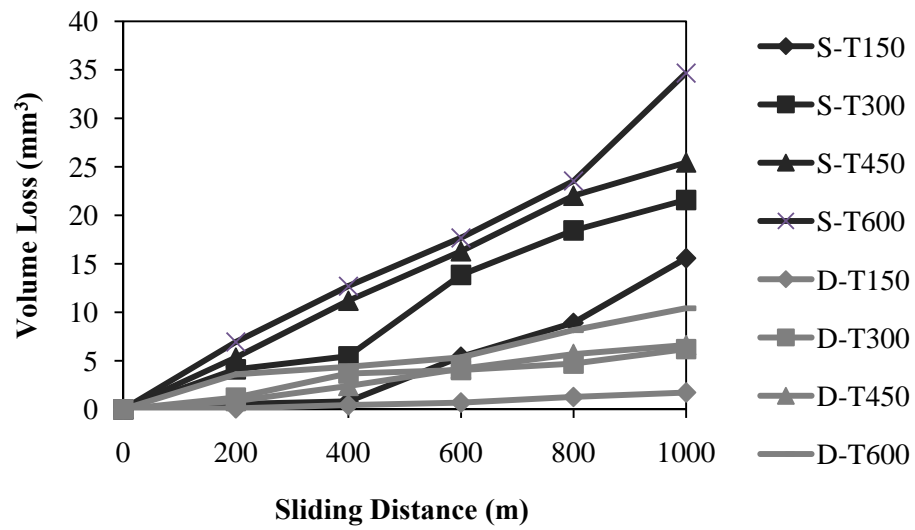
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับระยะทางที่ทดสอบ
 ชั่งงานเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ที่แรงกด 50 นิวตัน

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงเสียดทานของเหล็กกล้าทั้งสองประเภทที่ได้จากการทดสอบ

แรงกด (N)	ชื่อตัวอย่างชิ้นงาน	แรงเสียดทาน (N)
10	S-T150	12.91
	S-T300	9.86
	S-T450	8.96
	S-T600	6.28
	D-T150	9.85
	D-T300	10.15
	D-T450	8.45
	D-T600	7.45
50	S-T150	23.31
	S-T300	23.11
	S-T450	20.86
	S-T600	19.75
	D-T150	23.72
	D-T300	23.19
	D-T450	20.69
	D-T600	20.66

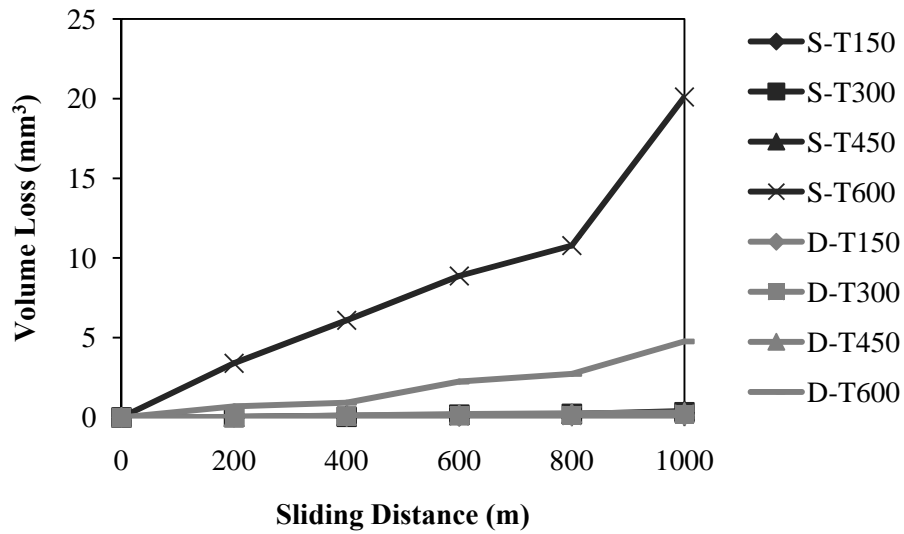
4.5 ปริมาตรที่สูญเสียไป volume loss

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสูญเสีย (Volume Loss) กับระยะทางในการทดสอบ (Sliding Distance) ของชุดการทดลองเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติกและเหล็กกล้าเครื่องมือเย็นที่เป็นชิ้นงานภายใต้แรงกด 10 และ 50 นิวตัน พบว่าปริมาตรที่สูญเสียไปเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่ใช้ในการทดสอบ จากรูปที่ 4.10 และ 4.12 เมื่อพิจารณากลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก พบว่าปริมาตรการสึกหรอที่สูงที่สุดคือชุดการทดสอบที่หมุนผ่านการอบคืนไฟที่ 600 องศาเซลเซียส และปริมาตรการสึกหรอมีค่าลดลงตามอุณหภูมิอบคืนไฟของหมุดที่ลดลงเป็น 450 300 และ 150 องศาเซลเซียส ส่วนของกลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมือเย็นก็มีลักษณะเดียวกันคือปริมาตรการสึกหรอที่สูงที่สุด คือของชุดการทดสอบที่หมุนผ่านการอบคืนไฟที่ 600 องศาเซลเซียส และลดลงตามอุณหภูมิอบคืนไฟของหมุดที่ลดลง 450 300 และ 150 องศาเซลเซียส

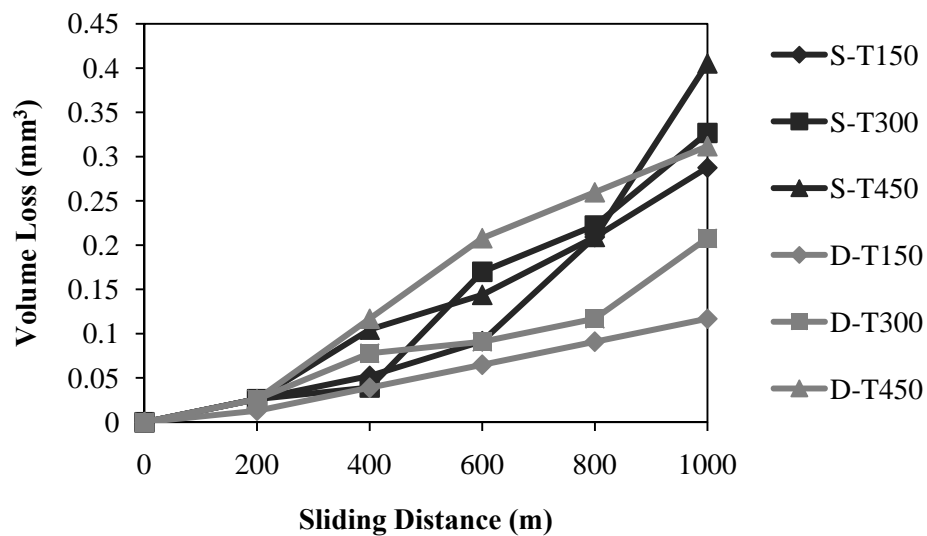


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการสึกหรอกับระยะทางที่ใช้ในการทดสอบของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 440C และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ชิ้นงานงานที่แรงกด 10 นิวตัน



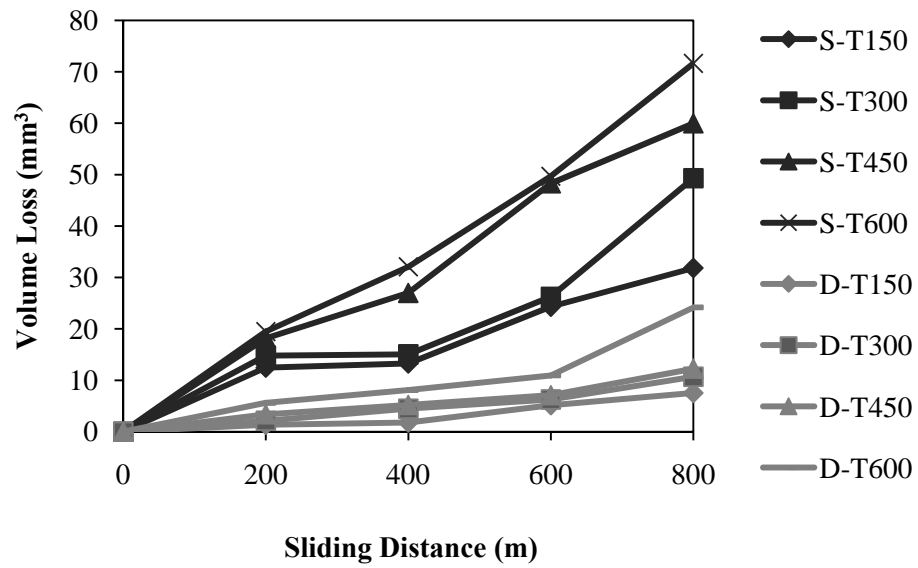


(ก)

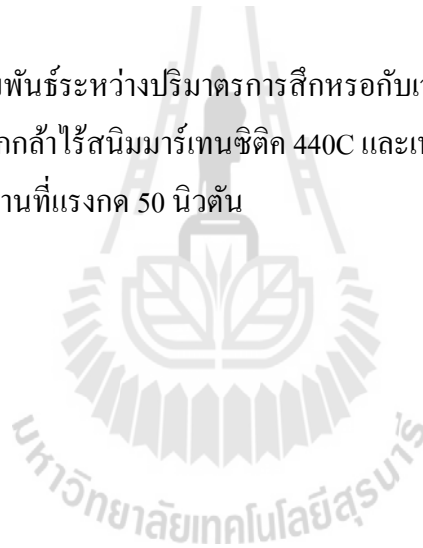


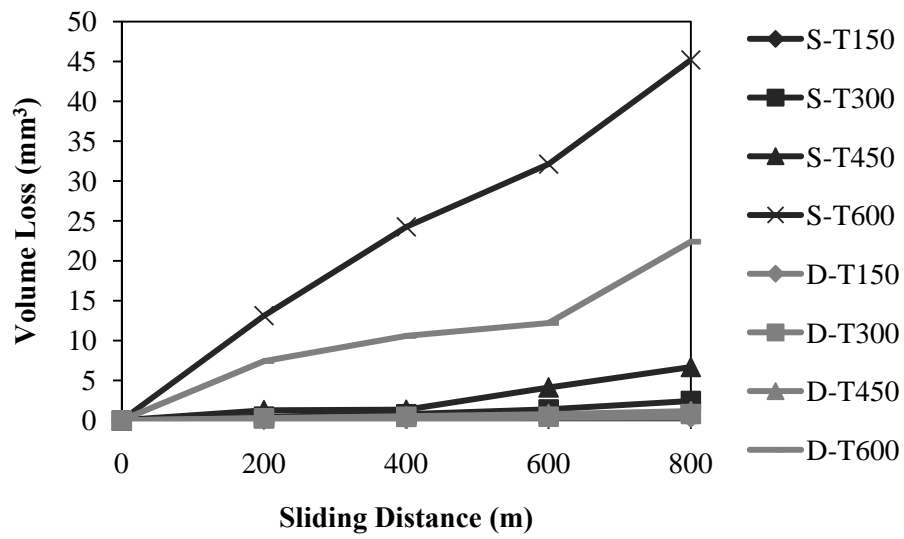
(ข)

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรการสึกหรอกับเวลาระยะที่ใช้ในการทดสอบของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 440C และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ขึ้นงานหมดที่แรงกด 10 นิวตัน (ก) รวมทุกชิ้นงาน (ข) ขยายรูป (ก) โดยกำหนดช่วงปริมาตรสูญเสีย 0-0.45 mm³

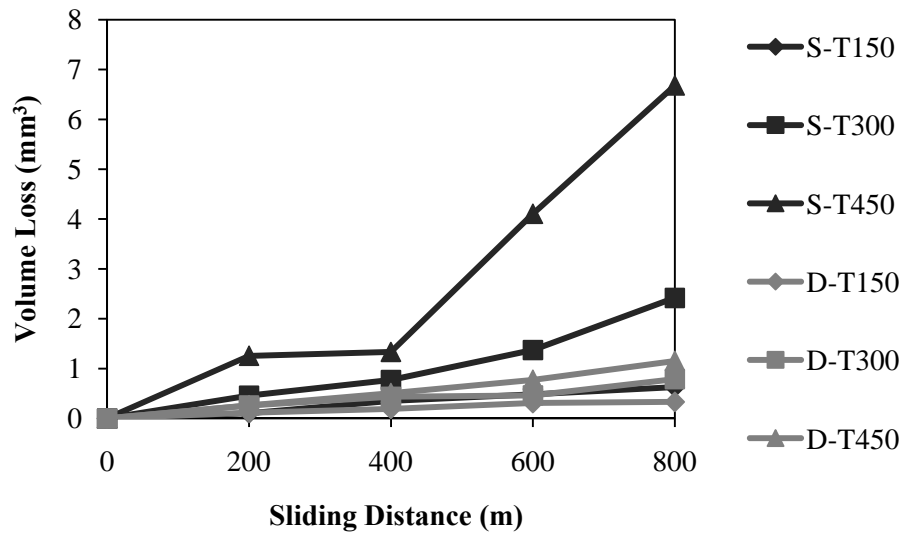


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรการสึกหรอกับเวลาระยะที่ใช้ในการทดสอบ
ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 440C และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2
ซึ่งงานงานที่แรงกด 50 นิวตัน





(ก)



(ข)

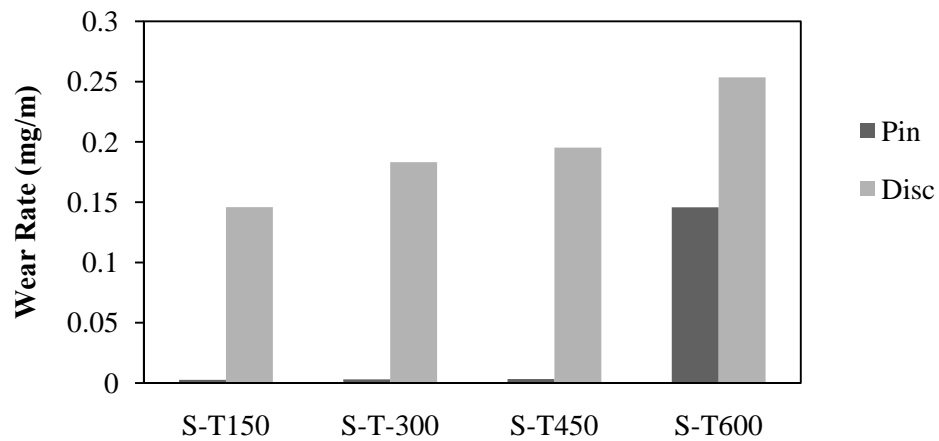
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรการสึกหรอกับเวลาระยะที่ใช้ในการทดสอบของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 440C และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ขึ้นงานหมุดที่แรงกด 50 นิวตัน (ก) รวมทุกชิ้นงาน (ข) ขยายรูป (ก) โดยกำหนดช่วงปริมาตรสูญเสีย 0-8 mm³

4.6 อัตราการสึกหรอของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 440C และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2

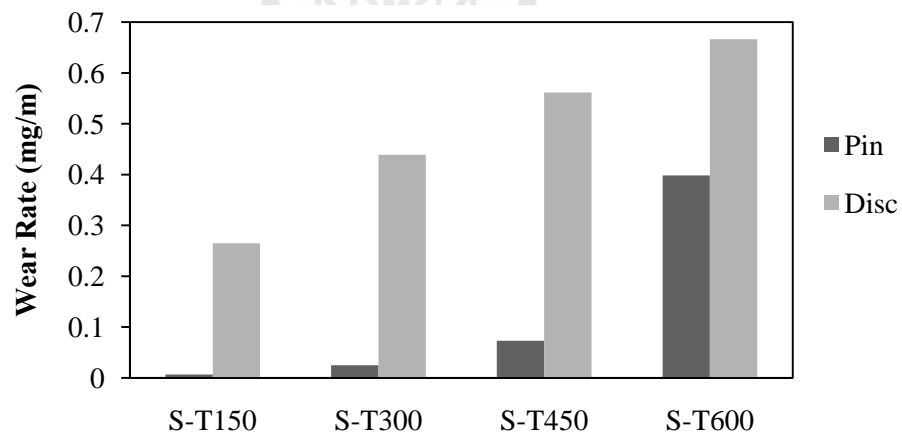
จากรูปที่ 4.14 ซึ่งแสดงอัตราการสึกหรอของหมุดและแผ่นจานของกลุ่มทดสอบต่างๆของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติกที่ทดสอบด้วยแรงกด 10 นิวตัน เห็นได้ว่าอัตราการสึกหรอของหมุดในแต่ละกลุ่มทดสอบเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆตามอุณหภูมิในการอบคืนไฟที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.3 แสดงอัตราการสึกหรอของกลุ่มทดสอบต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอของเหล็กกล้าทั้งสองประเภทที่ใช้แรงกด 10 นิวตัน พบว่าการอบคืนไฟที่ 150 องศาเซลเซียส อัตราการสึกหรอของหมุดในเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติกเป็น 0.0026 มิลลิกรัมต่อเมตร อัตราการสึกหรอของจานเป็น 0.1458 มิลลิกรัมต่อเมตร ส่วนกลุ่มทดสอบที่หมุดผ่านการอบคืนไฟที่ 600 องศาเซลเซียส อัตราการสึกหรอของหมุดเป็น 0.1457 มิลลิกรัมต่อเมตร อัตราการสึกหรอของจานเป็น 0.2536 มิลลิกรัมต่อเมตร ในส่วนอัตราการสึกหรอของหมุดเหล็กกล้าเครื่องมือเย็นที่ผ่านการอบคืนไฟที่ 150 องศาเซลเซียสเป็น 0.001 มิลลิกรัมต่อเมตร และอัตราการสึกหรอของจานเป็น 0.0158 มิลลิกรัมต่อเมตร และในกรณีการอบคืนไฟที่ 600 องศาเซลเซียส อัตราการสึกหรอของหมุดเป็น 0.0383 มิลลิกรัมต่อเมตร และอัตราการสึกหรอของจาน 0.0670 มิลลิกรัมต่อเมตร เห็นได้ว่าอัตราการสึกหรอของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติกสูงกว่าของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็นทั้งการอบคืนไฟที่อุณหภูมิต่ำและสูง

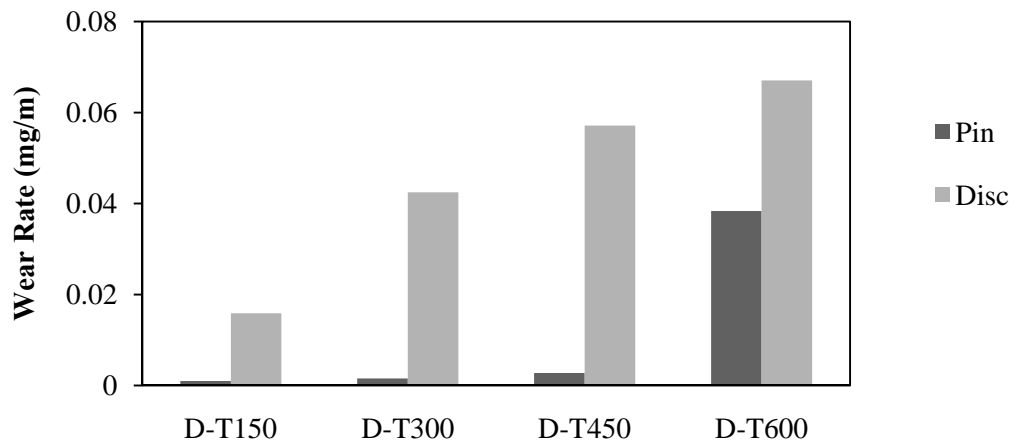
พิจารณาถึงอัตราการสึกหรอของเหล็กกล้าทั้งสองประเภทที่ใช้แรงในการกด 50 นิวตัน พบว่าอัตราการสึกหรอสูงขึ้นกว่าที่ใช้แรงกด 10 นิวตัน จากรูปที่ 4.15 ซึ่งเป็นกราฟแท่งแสดงอัตราการสึกหรอของหมุดที่อุณหภูมิกอบคืนไฟต่างๆ เห็นได้ว่ามีอัตราการสึกหรอเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับอัตราการสึกหรอของแผ่นจาน และในรูปที่ 4.17 เป็นกราฟอัตราการสึกหรอของหมุดและจานของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็นโดยแนวโน้มของอัตราการสึกหรอสูงขึ้นเช่นเดียวกับที่พบในกรณีเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก



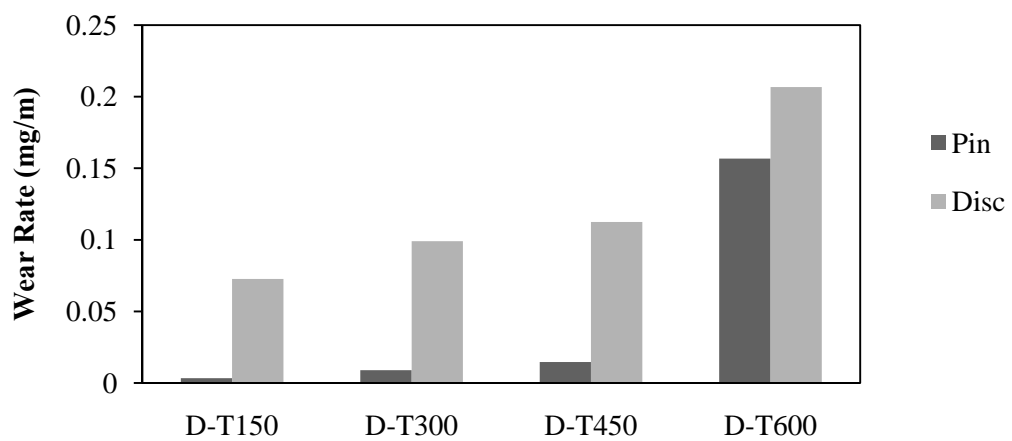
รูปที่ 4.14 อัตราการสึกหรอของหมุดและจานของคู่การทดสอบต่างๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 440C แรงกด 10 นิวตัน ที่ระยะทาง 1000 เมตร



รูปที่ 4.15 อัตราการสึกหรอของหมุดและจานของคู่การทดสอบต่างๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 440C แรงกด 50 นิวตัน ที่ระยะทาง 800 เมตร



รูปที่ 4.16 อัตราการสึกหรอของหมุดและจานของคู่การทดสอบต่างๆ
ของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 แรงกด 10 นิวตัน
ที่ระยะทาง 1000 เมตร



รูปที่ 4.17 อัตราการสึกหรอของหมุดและจานของคู่การทดสอบต่างๆ
เหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 แรงกด 50 นิวตัน
ที่ระยะทาง 800 เมตร

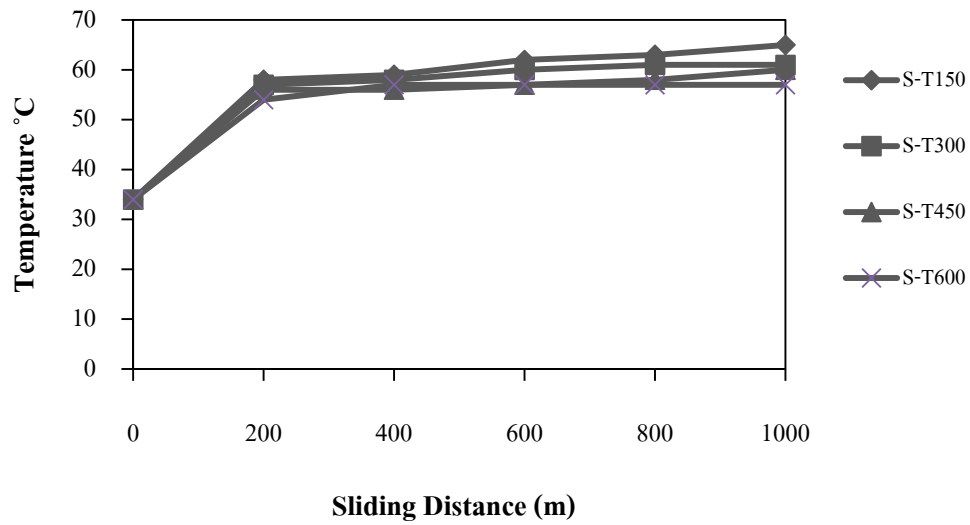
ตาราง 4.3 อัตราการสึกหรอของเหล็กกล้าทั้งสองชนิดภายหลังจากการทดสอบการสึกหรอ

แรงกด (N)	วัสดุ	Wear rate (mg/m)	
		Pin	Disc
10	S-T150	0.0026	0.1458
	S-T300	0.0030	0.1832
	S-T450	0.0033	0.1952
	S-T600	0.1457	0.2536
	D-T150	0.0010	0.0158
	D-T300	0.0015	0.0424
	D-T450	0.0027	0.0571
	D-T600	0.0383	0.0670
50	S-T150	0.0065	0.2647
	S-T300	0.0248	0.4388
	S-T450	0.0729	0.5615
	S-T600	0.3982	0.6662
	D-T150	0.0033	0.0727
	D-T300	0.0090	0.0990
	D-T450	0.0147	0.1124
	D-T600	0.1568	0.2067

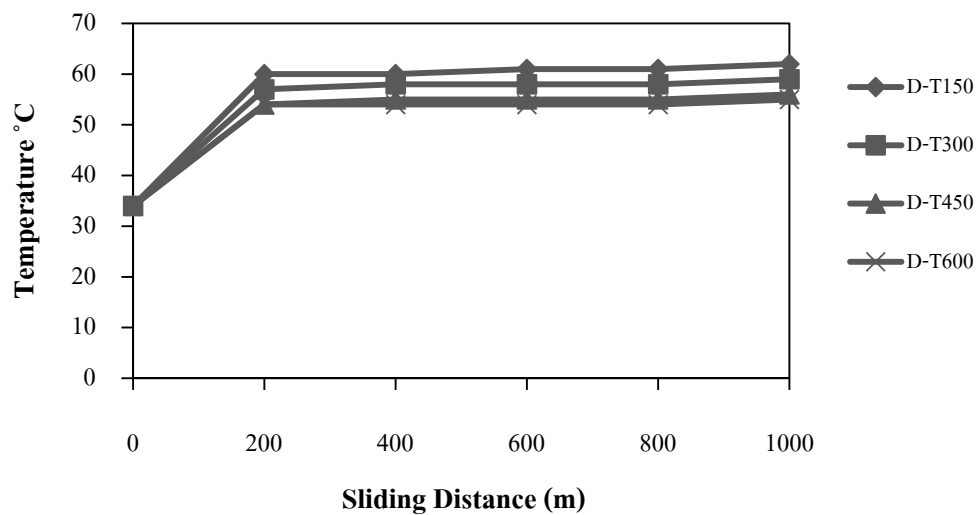
4.7 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ

อุณหภูมิที่วัดได้ในขณะทดสอบด้วยแรงกด 10 นิวตัน แสดงดังในรูปที่ 4.18-4.19 ซึ่งพบว่า ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติคเมื่อทดสอบที่ระยะทางต่างๆจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนไฟ 150 องศาเซลเซียสมีอุณหภูมิสูงที่สุดที่ระยะทางในการทดสอบ 1000 เมตรและ รองลงมาคือคูการทดสอบของหมุดที่ผ่านการอบคืนไฟ 300 450 และ 600 องศาเซลเซียส ดังแสดง ในตารางที่ 4.4

อุณหภูมิของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือเย็นที่ทดสอบด้วยแรงกด 10 นิวตัน พบว่าที่คูการทดสอบที่หมุดผ่านการอบคืนไฟที่ 150 องศาเซลเซียส มีอุณหภูมิที่สูงกว่าของคูการทดสอบที่หมุด ผ่านการอบคืนไฟที่ 300 450 และ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อพิจารณากับแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น พบว่าคูการทดสอบของหมุดที่ผ่านการอบคืนไฟ 150 องศาเซลเซียสจะมีค่าแรงเสียดทานที่สูงที่สุด และมีอุณหภูมิที่สูงที่สุด ดังนั้นอุณหภูมิในการอบคืนไฟที่สูงขึ้นส่งผลต่อค่าแรงเสียดทานและ อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างทดสอบ โดยค่าแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่าง ทดสอบเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบการสึกหรอ กับระยะทางที่ใช้ในการทดสอบของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค 440C ที่ทดสอบด้วยแรงกด 10 นิวตัน



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบการสึกหรอ กับระยะทางที่ใช้ในการทดสอบของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ที่ทดสอบด้วยแรงกด 10 นิวตัน

ตาราง 4.4 อุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในระหว่างทดสอบพินออดนิสก์ที่ระยะทางต่างๆ แรงกด 10 นิวตัน

วัสดุ	อุณหภูมิอบ กินไฟ(°C)	ระยะทาง (m)					
		0	200	400	600	800	1000
เหล็กกล้าไร้สนิม มาร์เทนซิติก 440C	150	34	58	59	62	63	65
	300	34	57	58	60	61	61
	450	34	56	56	57	58	60
	600	34	54	57	57	57	57
เหล็กกล้าเครื่องมือ เย็น D2	150	34	60	60	61	61	62
	300	34	57	58	58	58	59
	450	34	54	55	55	55	56
	600	34	54	54	54	54	55

4.8 พื้นผิวการสึกหรอและเศษการสึกหรอ

4.8.1 เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก 440C

การศึกษาพื้นผิวการสึกหรอด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสามมิติ (Stereo Microscope) ของหมุดในกลุ่มการทดสอบที่ใช้แรงกด 10 นิวตัน และความเร็วในการไถ 0.5 เมตรต่อวินาที แสดงในรูปที่ 4.20 พบว่าในหมุดที่อบกินไฟที่ 150 องศาเซลเซียสนั้นพื้นผิวการสึกหรอมีลักษณะเป็นชั้นของเนื้อวัสดุเชื่อมติดกันอยู่เป็นจำนวนมากดังในรูป 4.20 (ก) ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของกลไกการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear) โดยการยึดติดเกิดบริเวณรอยต่อระหว่างผิวสัมผัส การเคลื่อนที่ทำให้เกิดแรงดึงส่วนที่อ่อนแอบริเวณใต้ผิวการสึกหรอนี้ก็ขาดออกจากกัน กลายเป็นเศษการสึกหรอในลักษณะแผ่นหนา ดังแสดงในรูปที่ 4.24 (ก) ในกรณีของหมุดที่อบกินไฟที่ 300 และ 450 องศาเซลเซียสพบว่าที่พื้นผิวการสึกหรอมีลักษณะของการเชื่อมต่อกันระหว่างเนื้อวัสดุและร่องรอยของการถูกขูดเป็นร่องซึ่งเกิดมาจากการมีเศษโลหะที่เกิดขึ้นในขณะที่ทดสอบเข้ามาแทรกอยู่ระหว่างผิวสัมผัส โดยเศษการสึกหรอที่พบมีลักษณะเป็นทั้งแผ่นหนา และแผ่นบางที่มีขอบคม และขดเป็นเกลียว ดังแสดงในรูป 4.24 (ข) และ (ค) ในรูปที่ 4.20 (ง) พื้นผิวการสึกหรอแสดงลักษณะเป็นร่องละเอียด (groove) ขนานตามทิศทางการไถ ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของการสึกหรอแบบขูดขีด (Abrasive Wear) และเศษการสึกหรอที่พบมีลักษณะเป็นแผ่นบางและคมดังรูปที่ 4.24 (ง)

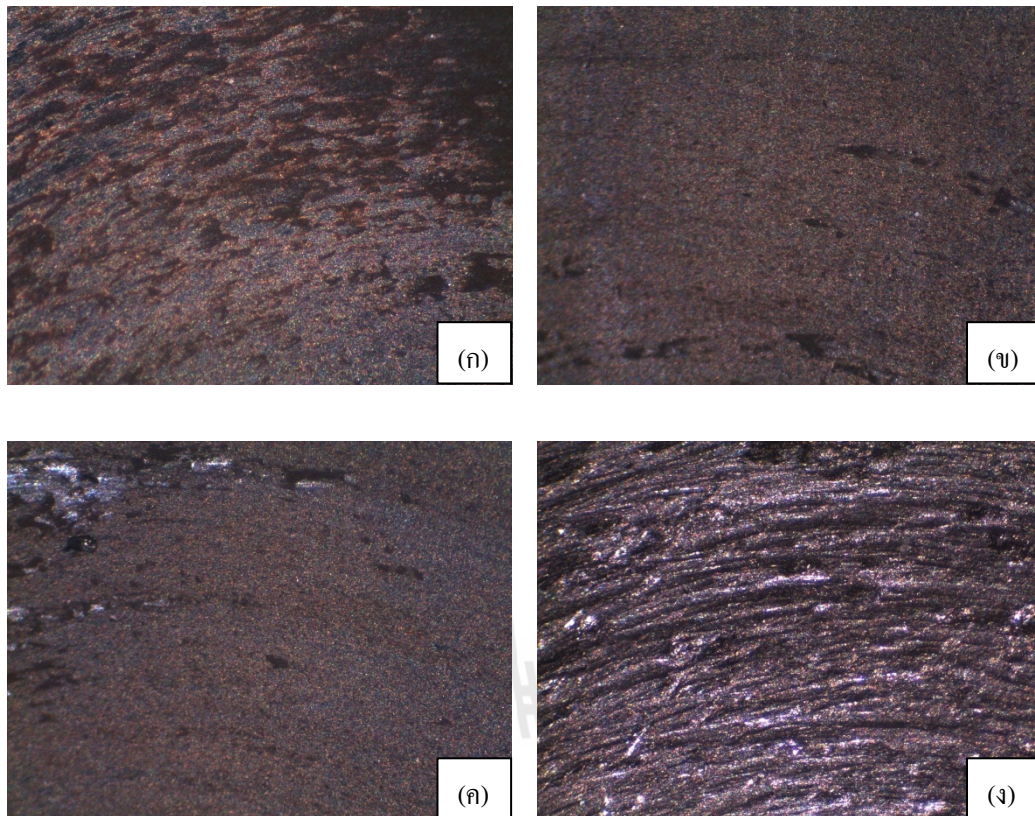
ในรูปที่ 4.21 แสดงพื้นผิวการสึกหรอภายหลังการทดสอบการสึกหรอของหมุดผ่านการอบคืนไฟที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้แรงกด 50 นิวตัน สังเกตเห็นได้ว่าพื้นผิวการสึกหรอจะเป็นลักษณะถูกขูดเป็นร่อง โดยความรุนแรงของการสึกหรอที่พื้นผิวและปริมาตรสึกหรอจะเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่ทดสอบ เศษการสึกหรอที่เกิดขึ้นจากการสึกหรอแบบขูดขีดเป็นอนุภาคขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ประกอบกัน

4.8.2 เหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2

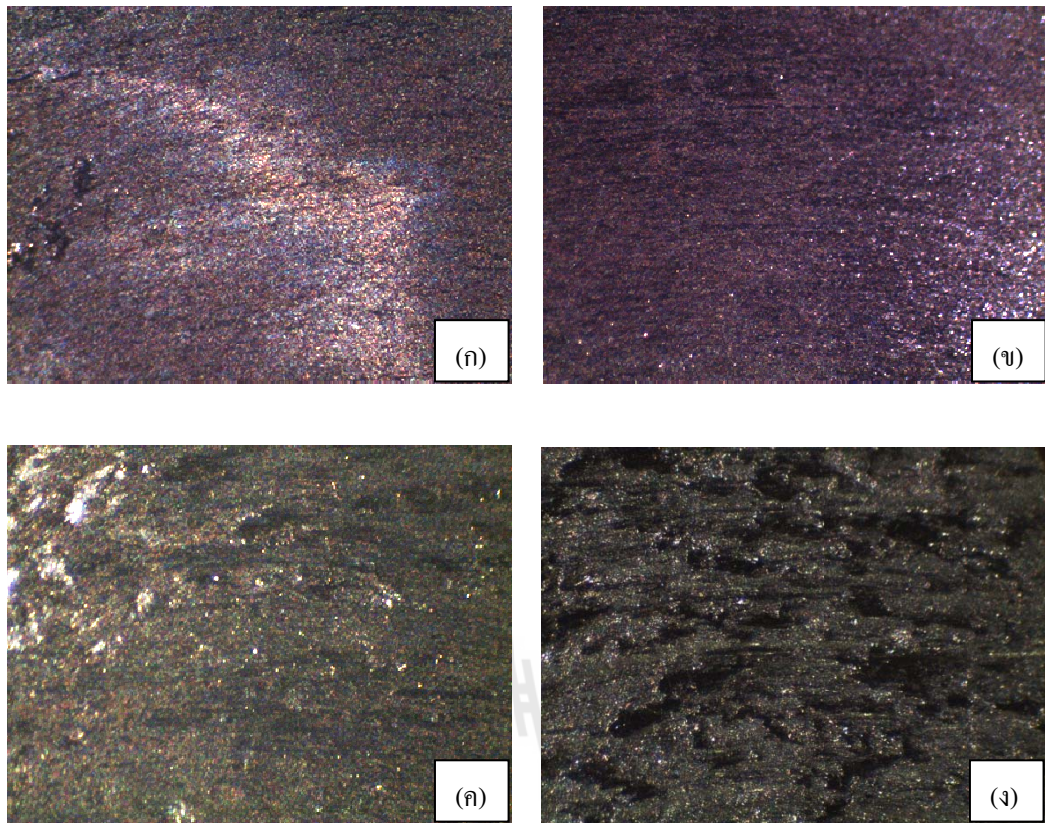
พื้นผิวการสึกหรอของคู่การทดสอบที่เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น ซึ่งทดสอบภายใต้แรงกด 10 นิวตัน แสดงในรูปที่ 4.22 (ก-ง) รูปดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการสึกหรอที่เกิดขึ้นเป็นแบบยึดติด เมื่อพิจารณาที่พื้นผิวปรากฏการเชื่อมติดกันของวัตถุจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการอบคืนไฟ ในรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นถึงพื้นผิวการสึกหรอของคู่ที่ทดสอบภายใต้แรงกด 50 นิวตัน โดยในรูป 4.23 (ก) และ (ข) ลักษณะพื้นผิวที่พบเป็นการสึกหรอแบบขูดขีดที่มีระดับความเสียหายต่ำ เนื่องจากรอยที่ถูกขูดมีลักษณะไม่ลึกมากเมื่อนำมาเทียบกับรูป (ค-ง) โดยเศษการสึกหรอที่เกิดขึ้นนี้จะมีลักษณะเป็นแผ่นบางและคม เมื่อพิจารณาร่วมกับอุณหภูมิอบคืนไฟพบว่าพื้นผิวการสึกหรอของคู่การทดสอบของหมุดอบคืนไฟที่ 150 300 450 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นการสึกหรอแบบขูดขีด คู่การทดสอบของหมุดที่อุณหภูมิอบคืนไฟ 150 และ 300 องศาเซลเซียสเป็นลักษณะการสึกหรอแบบขูดขีดที่ความรุนแรงต่ำ และความรุนแรงของการสึกหรอเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการอบคืนไฟเพิ่มขึ้น

ในช่วงที่เกิดการสึกหรอ มีการสร้างพันธะแบบยึดติดและการแตกหักจากผิววัสดุจะเกิดขึ้นพร้อมๆกันอย่างต่อเนื่องเป็นผลทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุจากผิวหนึ่งไปยังอีกผิวหนึ่งตลอดเวลาซึ่งมักจะเกิดขึ้นทั้ง 2 ทางทั้งนี้เหล็กกล้าทั้งสองประเภทเป็นโครเมียมกับเหล็ก เมื่อพิจารณาความเข้ากันได้ทางโครงสร้างในรูปที่ 2.7 พบว่ามีความเข้ากันได้ทางโครงสร้างสูง ดังนั้นแรงเสียดทานและการสึกหรอที่เกิดขึ้นระหว่างสองผิวนี้จึงมีค่าสูง

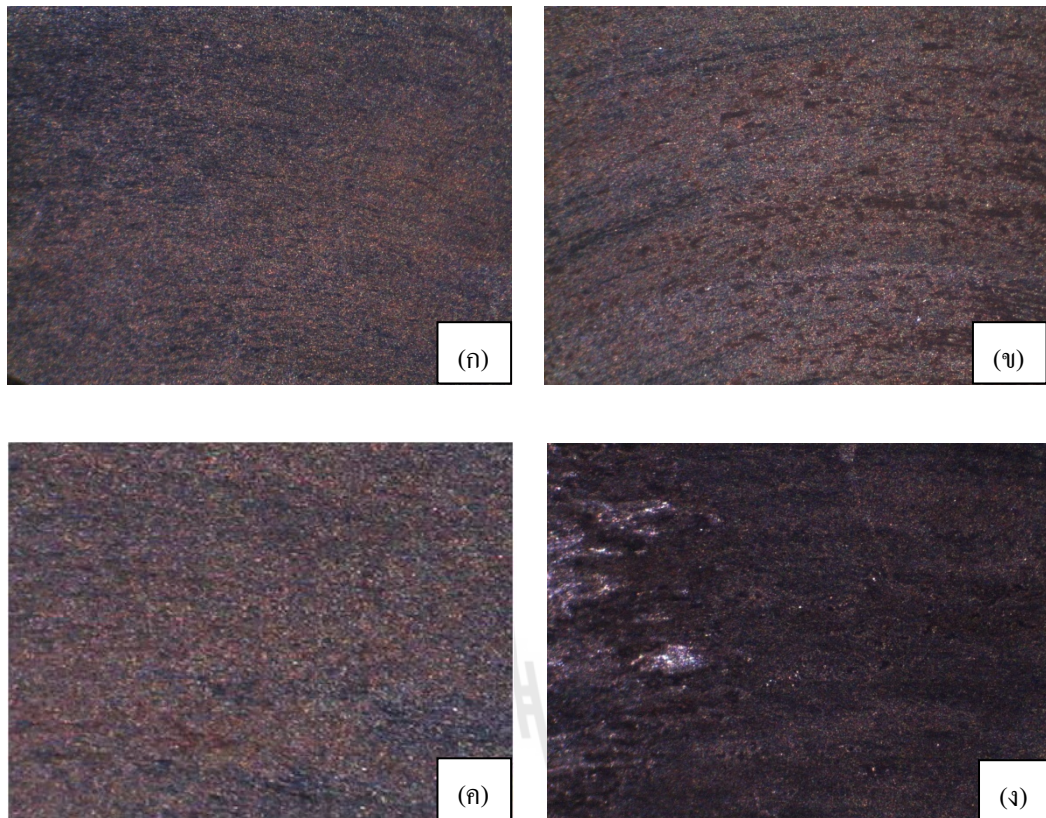
ขนาดอนุภาคที่เกิดการสึกหรอของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติกและเหล็กกล้าเครื่องมือเย็นพบว่าขนาดอนุภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติกมีขนาดที่ใหญ่กว่าของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็นเมื่อพิจารณาที่กำลังขยายเดียวกัน



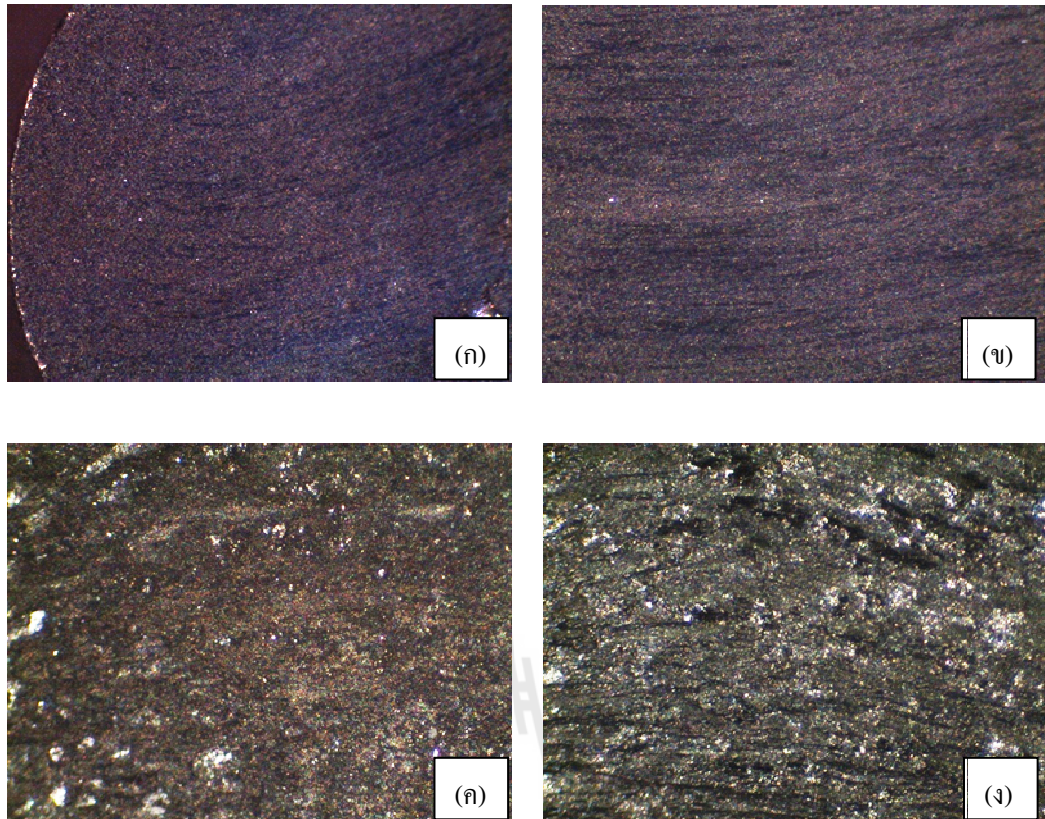
รูปที่ 4.20 พื้นผิวการสีกหรือภายหลังการทดสอบการสีกหรือของหมุดชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม มาร์เทนซิติค 440C ภายใต้แรงกด 10 นิวตัน (ก) อบคั้นไฟ 150 องศาเซลเซียส (ข) อบคั้นไฟ 300 องศาเซลเซียส (ค) อบคั้นไฟ 450 องศาเซลเซียส (ง) อบคั้นไฟ 600 องศาเซลเซียส



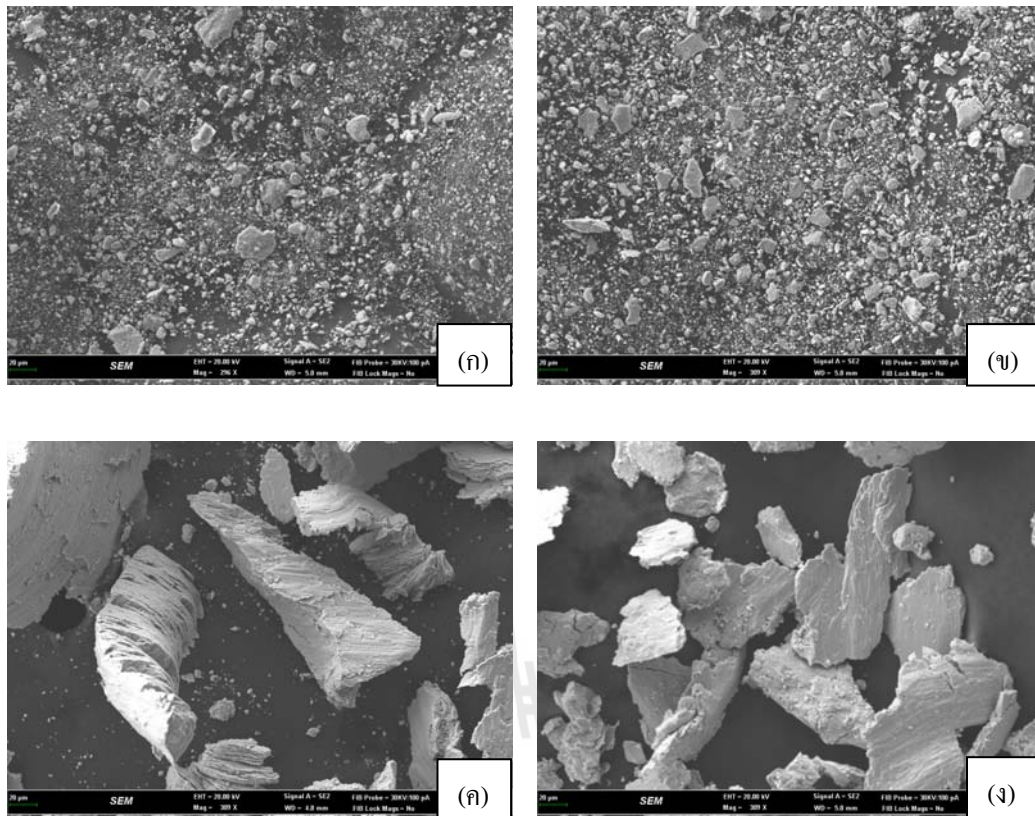
รูปที่ 4.21 พื้นผิวการสึกหรอภายหลังการทดสอบการสึกหรอของหมุดชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม มาร์เทนซิติก 440C ภายใต้แรงกด 50 นิวตัน (ก) อบคั้นไฟ 150 องศาเซลเซียส (ข) อบคั้นไฟ 300 องศาเซลเซียส (ค) อบคั้นไฟ 450 องศาเซลเซียส (ง) อบคั้นไฟ 600 องศาเซลเซียส



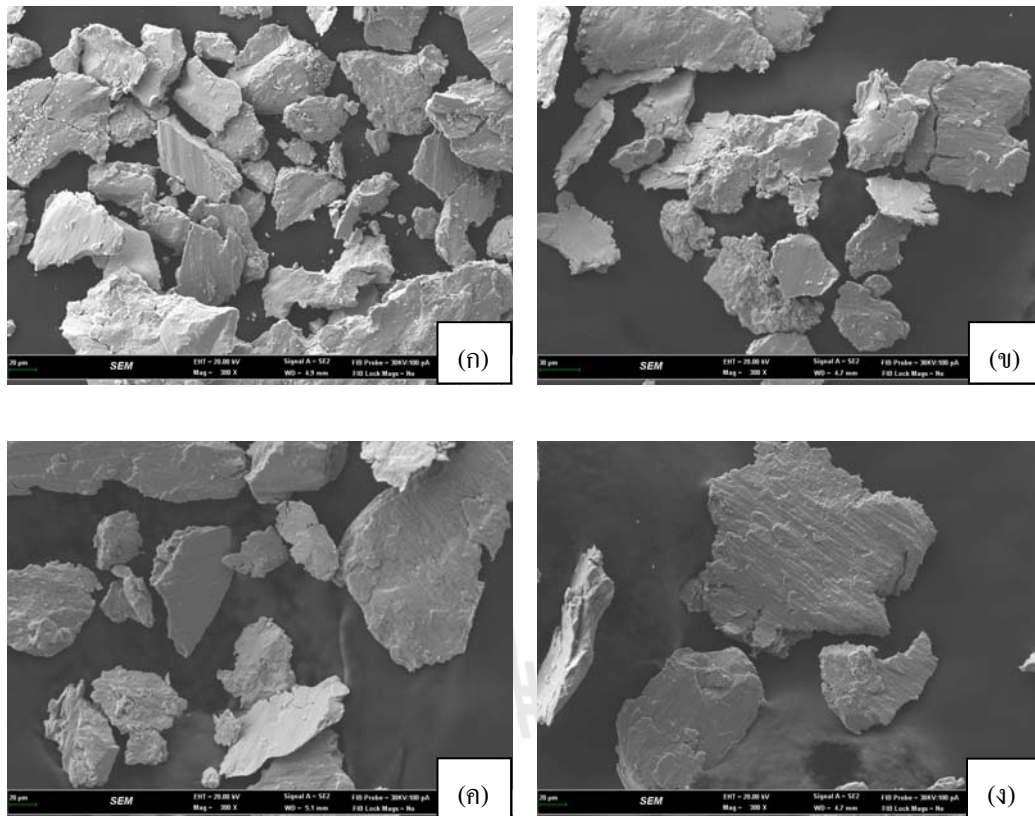
รูปที่ 4.22 พื้นผิวการสึกหรอภายหลังการทดสอบการสึกหรอของหมุดชิ้นงานเหล็กกล้า
เครื่องมือเย็น D2 ภายใต้แรงกด 10 นิวตัน (ก) อบคั้นไฟ 150 องศาเซลเซียส
(ข) อบคั้นไฟ 300 องศาเซลเซียส (ค) อบคั้นไฟ 450 องศาเซลเซียส
(ง) อบคั้นไฟ 600 องศาเซลเซียส



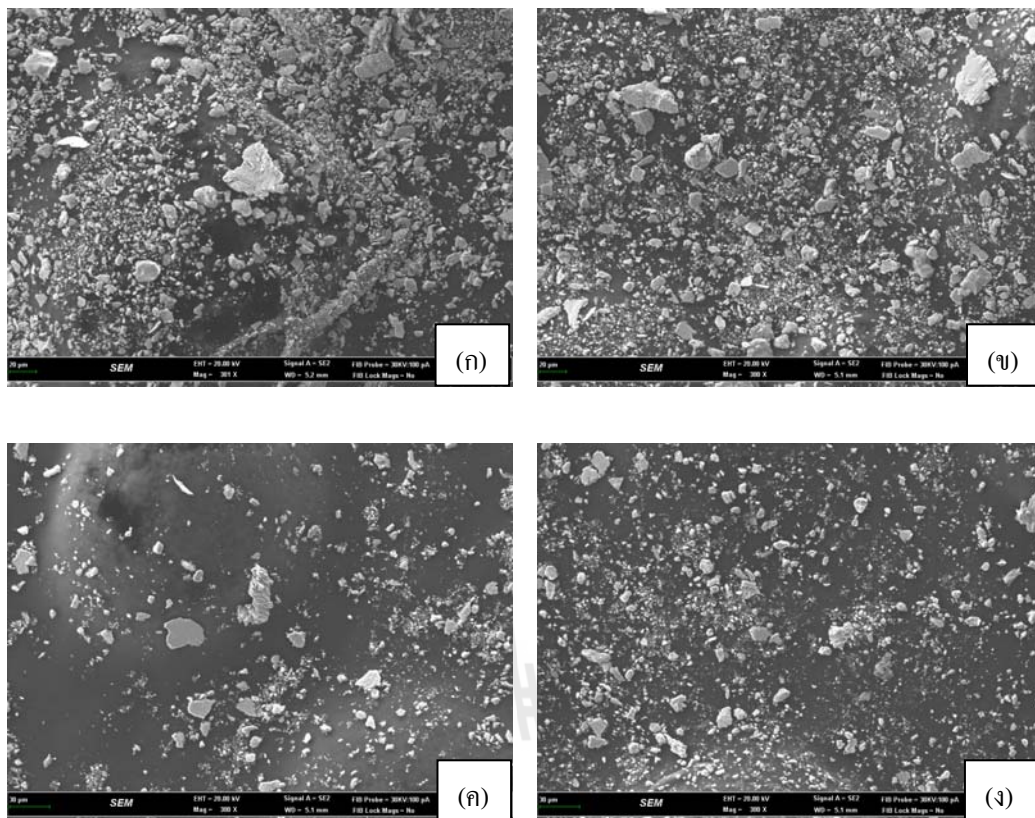
รูปที่ 4.23 พื้นผิวการสึกหรอภายหลังการทดสอบการสึกหรอของหมุดชิ้นงานเหล็กกล้า เครื่องมือเขียน D2 ภายใต้แรงกด 50 นิวตัน (ก) อบคั้นไฟ 150 องศาเซลเซียส (ข) อบคั้นไฟ 300 องศาเซลเซียส (ค) อบคั้นไฟ 450 องศาเซลเซียส (ง) อบคั้นไฟ 600 องศาเซลเซียส



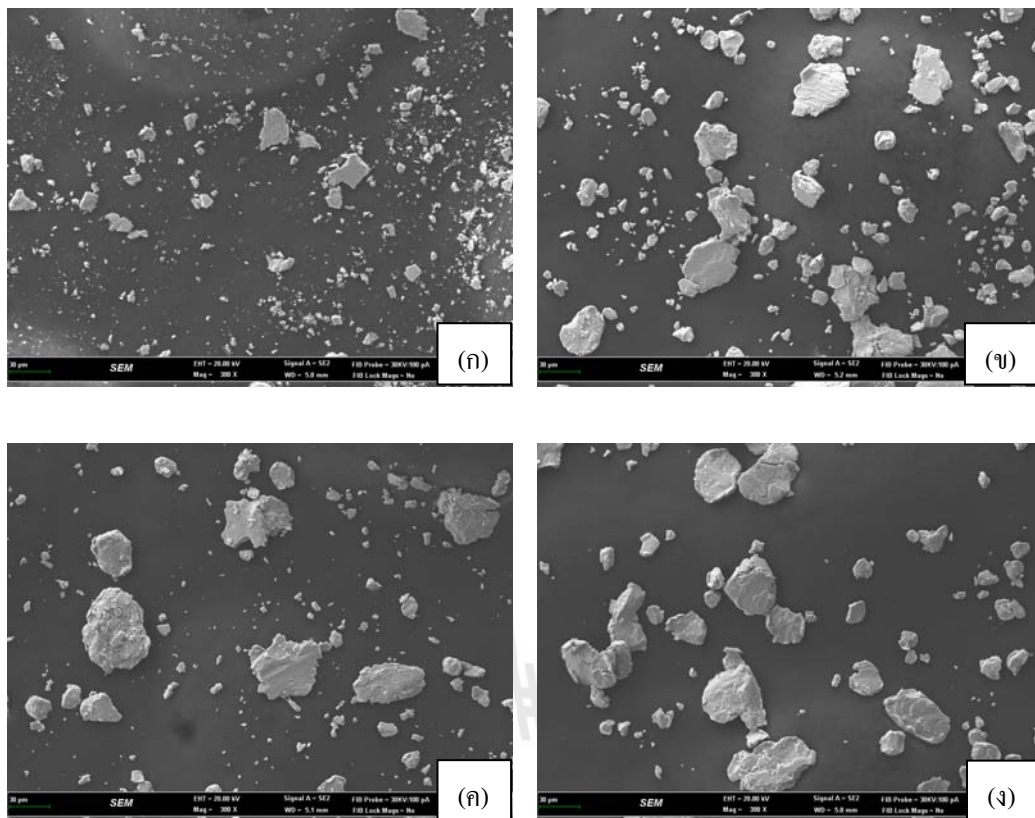
รูปที่ 4.24 เศษสีกหอรอภายหลังการทดสอบการสีกหอรอชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค 440C ภายใต้แรงกด 10 นิวตัน (ก) อบคั้นไฟ 150 องศาเซลเซียส (ข) อบคั้นไฟ 300 องศาเซลเซียส (ค) อบคั้นไฟ 450 องศาเซลเซียส (ง) อบคั้นไฟ 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.25 เศษการสีกหรือภายหลังกการทดสอบการสีกหรือชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิดิก 440C ภายใต้แรงกด 50 นิวตัน (ก) 150 องศาเซลเซียส (ข) 300 องศาเซลเซียส (ค) 450 องศาเซลเซียส (ง) 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.26 เศษการสึกหรอภายหลังการทดสอบการสึกหรอเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ภายใต้แรงกด 10 นิวตัน (ก) อบคีนไฟ 150 องศาเซลเซียส (ข) อบคีนไฟ 300 องศาเซลเซียส (ค) อบคีนไฟ 450 องศาเซลเซียส (ง) อบคีนไฟ 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.27 เศษการสึกหรอภายหลังการทดสอบการสึกหรอเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ภายใต้แรงกด 50 นิวตัน (ก) อบคั้นไฟ 150 องศาเซลเซียส (ข) อบคั้นไฟ 300 องศาเซลเซียส (ค) อบคั้นไฟ 450 องศาเซลเซียส (ง) อบคั้นไฟ 600 องศาเซลเซียส

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการศึกษาความต้านทานการสึกหรอของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 440C และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น AISI D2 ที่ได้จากการทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่องพินออนดิस्क การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค การทดสอบสมบัติเชิงกล และลักษณะความเสียหายทางกายภาพ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

5.1.1 เมื่อควบคุมให้ความแข็งของแผ่นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 440C และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น AISI D2 มีความแข็งที่ 39.8 และ 40.4 HRC ตามลำดับ อัตราการสึกหรอของหมุดและแผ่นงานเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความแข็งของหมุดลดลง คู่การทดสอบของหมุดที่มีความแข็งสูงกว่าแผ่นงานมากเกิดการสึกหรอน้อยกว่าคู่การทดสอบที่หมุดและแผ่นงานมีความแข็งใกล้เคียงกัน

5.1.2 เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 440C และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น AISI D2 เมื่อผ่านการชุบแข็ง บำบัดเย็น และอบคืนไฟ โครงสร้างจุลภาคที่พบเป็นเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ คาร์ไบด์ปฐมภูมิและคาร์ไบด์ทุติยภูมิ ซึ่งปริมาณของคาร์ไบด์ทุติยภูมิเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการอบคืนไฟเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาร่วมกับอัตราการสึกหรอพบว่าคู่การทดสอบที่หมุดผ่านการอบคืนไฟ 600 องศาเซลเซียส มีอัตราการสึกหรอสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากมีปริมาณคาร์ไบด์มากกว่าของคู่การทดสอบที่อบคืนไฟด้วยอุณหภูมิต่างๆ โครงสร้างเนื้อพื้นเทมเปอร์มาร์เทนไซต์เปลี่ยนแปลงเข้าใกล้การเป็นเฟอร์ไรต์ในสมดุล จึงส่งผลให้มีอัตราการสึกหรอที่สูงกว่าสถานะในการอบคืนไฟอื่นๆ

5.1.3 เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 440C เกิดการสึกหรอสูงกว่าเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น AISI D2 เมื่อพิจารณาในทุกสภาวะการทดลอง

5.1.4 ชิ้นงานหมุดเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 440C และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น AISI D2 ที่มีความแข็งต่ำที่สุดเกิดการสึกหรอสูงที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป

5.2.1 การเตรียมผิวชิ้นงานทดสอบการสึกหรอของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก และเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น ต้องควบคุมความเรียบผิวของชิ้นงานและได้ระนาบให้เท่ากันทุกชิ้นและมีความเรียบสม่ำเสมอจนตลอดพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบ เพื่อป้องกันการคลาดเคลื่อนของน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นงานในขณะที่เริ่มต้นทดสอบ รวมไปถึงความสะอาดของผิวคู่สัมผัสเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสึกหรอจากวัสดุประเภทอื่นๆ

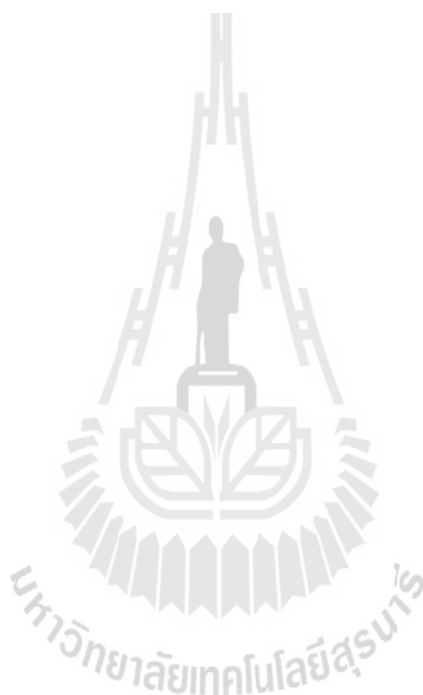
5.2.2 การควบคุมชิ้นงานในขณะที่ทดสอบการสึกหรอ ต้องควบคุมชิ้นงานหมุดให้ตั้งฉากกับชิ้นงานแผ่นงานเพื่อหลีกเลี่ยงผลการทดสอบที่ผิดพลาด



รายการอ้างอิง

- บริษัท ไทย-เยอรมันสเปเชียลสตีลเซ็นเตอร์ จำกัด. Martensitic Stainless Steel 4125. (Online).
แหล่งที่มา : www.thyssenkruppmaterials.co.th/dmdocuments/4125.pdf
- บริษัท ไทย-เยอรมันสเปเชียลสตีลเซ็นเตอร์ จำกัด. Cold Work Steel 2379. (online). แหล่งที่มา :
www.thyssenkruppmaterials.co.th/dmdocuments/2379.pdf
- มนัส สติรจินดา. 2543. วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระ
บรมราชูปถัมภ์.
- สิริพร โรจนนันต์, สุรศิษฐ์ โรจนนันต์ และสุทัศน์ ทิพย์ปรักมาศ (2550). กรณีศึกษาสาเหตุการเสีย
รูปของฟันซ์ในกระบวนการปั๊มขึ้นรูป. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล
แห่งประเทศไทยครั้งที่ 21, 17-19 ตุลาคม จังหวัดชลบุรี.
- ปนัดดา นิรนาทล้ำพงศ์ และคณะ. 2547. การสึกหรอในงานอุตสาหกรรม. ความรู้เบื้องต้นและการ
ป้องกัน. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- เบญจวรรณ แสงวิเชียร และชาวสวน กาญจน์มัย (2554). ผลกระทบของอุณหภูมิผิวสัมผัสต่อ
พฤติกรรมการสึกหรอของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ผลิตด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะ
ผง. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, 15-17
ตุลาคม มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.
- ASTM Standard G99-05, 2010, "Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk
Apparatus," **ASTM International**, West Conshohocken, PA, 2010, DOI:
10.1520/G0099-05R10, www.astm.org.
- Gunter Mennig. (1995). Wear in Plastic Processing How to Understand, Protect, and Avoid.
ASM International.
- Gwidon W Stachowiak. (2005). Wear Materials, Mechanism and Practice, Tribology in Practice
Series. John Wiley & Sons Inc.
- J.R. Yang, T.H. Yu, C.H. Wang. (2006). Martensitic transformations in AISI 440C stainless steel.
Materials Science and Engineering A. (438-440): 276-280.

- Linhu Tang, Chengxiu Gao, Jianlong Huang, Hongyan Zhang, Wenchun Chang (2013). Dry sliding friction and wear behaviour of hardened AISI D2 tool steel with different hardness levels. **Tribology International**.: 165-173.
- H. So. (1996). Characteristics of wear results tested by pin-on-disc at moderate to high speeds. **Tribology International Vol. 29**.: 415-423.





ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Dararat Arparjirasakul, Tapany Patcharawit, and Usanee Kitkamthorn. Dry Sliding Wear Characteristics of AISI440C Martensitic Stainless Steel. **International Conference on Advances in Engineering and Technology (ICAET'2014)**; 29-30 March; Singapore. (อยู่ในระหว่างดำเนินการตีพิมพ์)



Dry Sliding Wear Characteristics of AISI440C Martensitic Stainless Steel

Dararat Arparjirasakul¹, Tapany Patcharawit¹, and Usanee Kitkamthorn¹

Abstract—Dry sliding wear characteristics of AISI440C martensitic stainless steels was investigated by pin-on-disc testing. Pin and disc samples were austenitized at 1050°C for 40 minutes and quenched by flowing room temperature Ar gas. Samples were sub-zero treated in liquid nitrogen for 60 minutes. All discs were double tempered at 600°C whereas pins were double tempered at 150-600°C for 2 hours. Microstructures were examined by SEM. Hardness values were measured and pin-on-disc tests were carried out. Results showed that microstructure after tempering consisted of tempered martensite, primary carbide, and secondary carbides. Numbers of secondary carbides were larger at higher tempering temperature. AISI440C exhibited resistance to tempering at 450°C. Highest wear rate was found in the tests where pin and disc subjected to the same tempering temperature at 600°C. When pin was tempered at lower temperature, wear rate became lower. Worn surface revealed abrasive wear in pin and disc tempered at high temperature and adhesion wear in pin and disc tempered at lower temperature.

Keywords—Tempering, Wear, Stainless steel, Pin-on-disc

I. INTRODUCTION

In all industries, any improvement of service life of tool materials is on demand. Martensitic stainless steels are widely used as tool and die parts. AISI 440C is a high chromium and carbon martensitic stainless steel. Therefore, it has good hardenability and highest quenched hardness compared with other martensitic stainless steels. Microstructure of AISI 440C in annealed condition consists of ferrite matrix and disperse primary and eutectic carbides such as M_7C_3 and $M_{23}C_6$. To improve hardness and wear resistance, the steel is usually subjected to quenching and tempering. Microstructure after quenching comprises martensite, retained austenite and non-dissolve carbide [1]. Retained austenite is considered to be deleterious since it can cause distortion during service. The existence of retained austenite after quenching is a result of high amount of carbon and alloying elements in austenite, which lower the martensite finished temperature below room temperature [2-5]. Double or multiple tempering is carried out usually at 400-550°C for 2 hours in order to reduce amount of retained austenite and to reduce internal stress caused by martensitic transformation after quenching and first tempering. Alternatively, sub-zero treatment is the other method to reduce retained austenite prior

to tempering. Quenched steel is immersed into a medium at temperature below 0°C, which allows further martensitic transformation [6].

For tool and die parts, wear resistance is one of the most important characteristic of materials. Microstructure and hardness of materials play major roles on wear resistance. Therefore, the objective of this work was to investigate the effect of tempering temperature on microstructure, hardness, and wear resistance of AISI440C

II. EXPERIMENTAL PROCEDURES

A. Materials Preparation

The steel selected for this study is AISI440C martensitic stainless steel. The as-received steel is in annealed condition. Table I shows the chemical compositions of as-received AISI440C steel bars having slightly different chemical compositions. Pins and discs dimensions shown in Fig.1 were machined from $\phi 18$ mm and $\phi 30$ mm round bars, respectively.

TABLE I
CHEMICAL COMPOSITIONS OF MARTENSITIC STAINLESS STEELS.

Steels	Chemical composition (wt.%)						
	C	Cr	V	Mo	Si	Mn	Fe
440C (Disc)	1.35	15.91	0.06	0.45	0.43	0.48	Bal.
440C (Pin)	1.23	15.74	0.06	0.30	0.21	0.85	Bal.

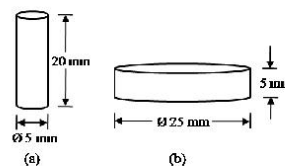


Fig. 1 Dimensions of pin and disc.

B. Heat Treatment

Pins and discs were subjected to austenitization at 1050°C for 40 minutes in a tube furnace with an Ar protective atmosphere and then quenching by placing the hot samples into another room temperature tube furnace. 5 liter/minute of Ar was flowed into the room temperature tube furnace to cool the samples. All quenched samples were sub-zero treated in liquid nitrogen for 60 minutes. Pin samples were double tempered at 150, 300, 450, and 600°C for 120 minutes each. All disc samples were double tempered at 600°C for 2 hours. Details of the heat treatment process are shown in Fig.2.

Dararat Arparjirasakul¹, Tapany Patcharawit¹, and Usanee Kitkamthorn¹ are with the School of Metallurgical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand (corresponding author's phone: +66816004579; e-mail: k_usanee@sut.ac.th)

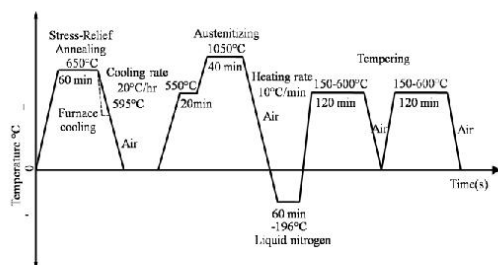


Fig. 2 Thermal treatment of AISI440C in this study

C. Microstructural Characterization

The metallographic specimens were prepared by grinding to 1200 grit, mechanical polishing using 0.3 μm alumina, and etching using 10% nital. The microstructures were observed using Jeol JSM 7800F scanning electron microscope equipped with Oxford energy-dispersive X-Ray spectrometer. In case of X-ray diffraction sample preparation, specimens were grounded, polished, and etched similar to metallographic specimen preparation. These specimens were repolished and re-etched for 3 times before final polishing in order to remove the surface deformation layer. Determination of martensite, retained austenite, and carbide was carried out using the Bruker-D8 Advance X-Ray diffractometer with $\text{CuK}\alpha$ radiation operating at 40 kV and 40 mA.

D. Hardness and Wear Testing

Bulk hardness values were measured by Rockwell hardness testing. Wear tests were carried out under dry sliding condition using pin-on-disc apparatus (following ASTM G99 [7]). Sample roughness was controlled to be 0.8 μm . Test loads were 10 N and 50 N. Friction forces were recording by the load cell unit and wear tests were continued using sliding speed of 0.5 m/s until the wear distance were 200, 400, 600, 800, and 1,000 m. Samples were weighed on a 4-digit Mettler Toledo ML204. Volume loss values of pin and discs samples were calculated from the following equation :

$$\text{Volume loss, mm}^3 = \frac{\text{mass loss, g}}{\text{density, g/cm}^3} \times 1000 \quad (1)$$

Wear rates were calculated from the average of ratio between volume loss upon sliding distance at every 200 m of sliding distance. Furthermore, worn surfaces after wear tests and wear debris generated during the tests were investigated using stereo microscope and SEM, respectively. Table II is the summary of pin and disc couples.

TABLE II
PIN AND DISC COUPLES

Wear test schemes	T150	T300	T450	T600
Pin tempering temperature (°C)	150	300	450	600
Disc tempering temperature (°C)	600	600	600	600

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. Microstructures

Microstructures examined by optical and scanning electron microscopy techniques are shown in Fig. 3 and 4. Primary carbide (PC) can be revealed by both techniques whereas secondary carbides can only be seen clearly in SEM micrographs. Primary carbides are large and their shapes are irregular. Secondary carbides (SC) are smaller and spherical. The distribution of SC is uniform but there is a different in size of SC, especially in the samples which were tempered at higher temperature.

XRD patterns of as-quenched sample showed that the microstructure consisted of some undissolved carbides, martensite, and very small amount of retained austenite. Peaks of primary carbides are corresponded to M_7C_3 ($\text{M}=\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Mo}, \text{V}$) [8]. Retained austenite peaks diminished in the patterns. These were due to the sub-zero treatment. Several peaks of carbide appeared after tempering.

B. Hardness and Wear Characteristics

Fig. 5 is the plot of hardness versus tempering temperatures. It can be seen that secondary hardening was not pronounced. This was due to the sub-zero treatment. Retained austenite existed after quenching further transformed into martensite when immersed into liquid nitrogen. Resistance to softening when tempering at about 450°C was caused by the formation of very fine secondary carbides having coherency with tempered martensite matrix. Tempering at 600°C led to faster growth of carbide. The population and sizes of secondary carbide of carbide are large. The latter resulted in coherency loss between carbide and matrix and thus strengthening was not effective.

Friction forces during the test were recorded and plotted as shown in Fig. 6. At the beginning of the tests the friction forces increased abruptly and then decreased to a steady state. Steady-state friction force was higher in the case of wear test with lower tempering temperature pin. Table III listed the friction coefficient of each tests. Volume loss values of pins and disc were calculated and their wear rates versus tempering temperature of pins were plotted in Fig.7. It can be seen clearly that pins subjected to high tempering temperature caused high volume loss values and high wear rates. Since discs were all the same hardness (about of about 42 HRC) obtained from double tempering at 600°C, therefore in all wear test schemes hardness values of discs were equal to or lower than those of pins depending on pin tempering temperature. The highest wear rates were found in the test where both pin and disc were tempered at 600°C. The higher hardness of pins did not caused higher wear rate comparing to the lower hardness pins.

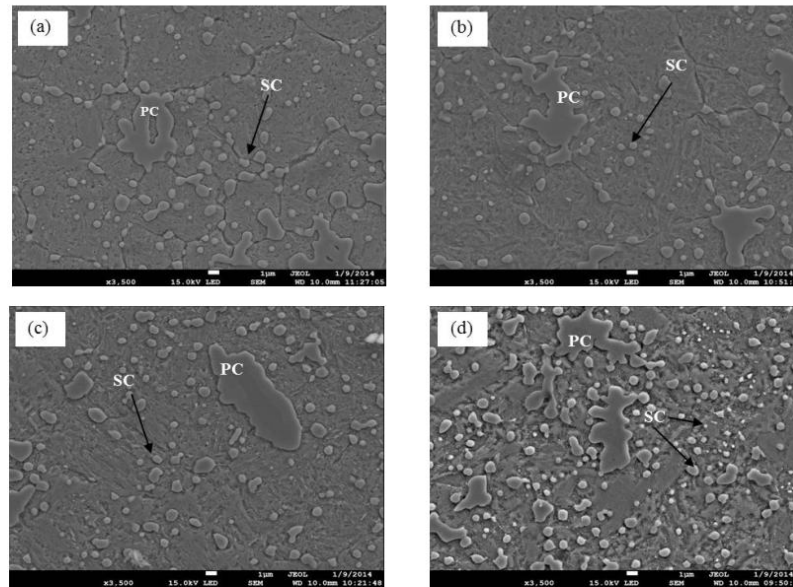


Fig. 3 Microstructure of AISI440C after tempering at (a) 150°C, (b) 300°C, (c) 450°C, and (d) 600°C

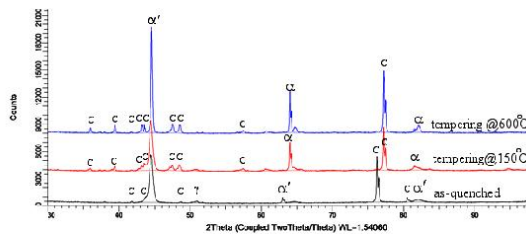


Fig. 4 X-ray diffraction pattern obtained from as-quenched, 150°C tempered, and 600°C tempered samples (α or α' -martensite, C – carbides).

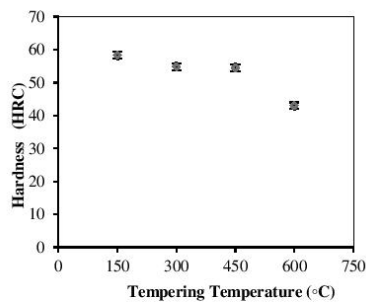


Fig. 5 Hardness versus tempering temperature

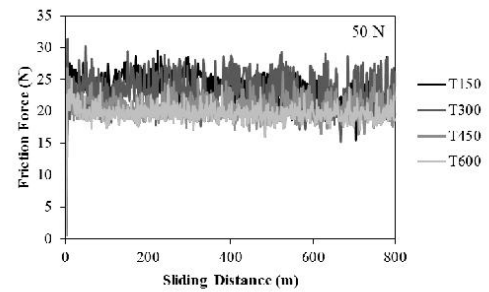
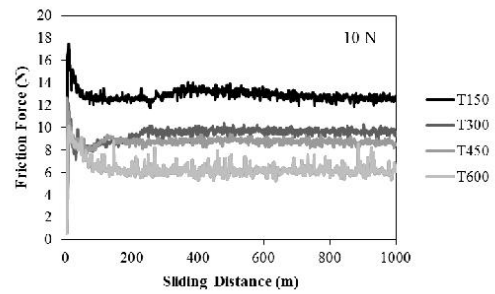


Fig. 6 Friction force versus sliding distance using 10 N loading and 50 N loading

TABLE III
FRICTION COEFFICIENTS OF EACH TEST

Load	T150	T300	T450	T600
10N	1.25	0.95	0.86	0.59
50N	0.45	0.42	0.40	0.37

Examples of worn surfaces of pin from the test using 10 N loading are shown in Fig. 8. In the case of wear testing using 150°C tempered pin, wear mechanisms was likely to be adhesive wear and in the case of wear testing using 600°C tempered pin, large groove caused by ploughing were found. The latter was a characteristic of abrasive wear. Fig.9 shows wear debris collected during the test. The sizes of debris became larger when tests were performed with pin subjected to higher tempering temperature. Martensite is a metastable phase, which can transform into ferrite and carbide if exposed to high temperature for long time. During tempering at high temperature, carbon atoms diffuse out of martensite and formed carbides. Martensite then became close to ferrite. Therefore, the higher the tempering temperature the closer to ferrite is. The latter phase has lower yield strength and thus easier to be cut or deformed plastically.

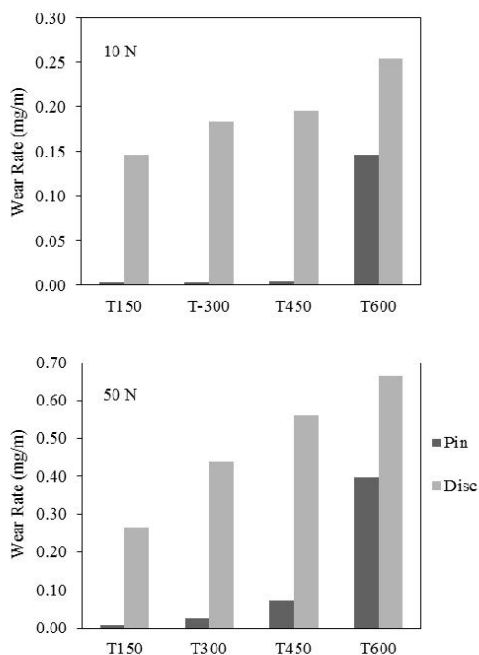


Fig. 7 Wear rate of Pin and Disc of Martensitic stainless steel 440C at load 10 N and 50 N

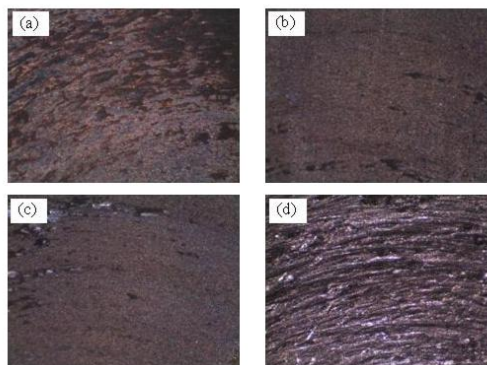


Fig 8 Wear surface after wear test I under 10 N loading.

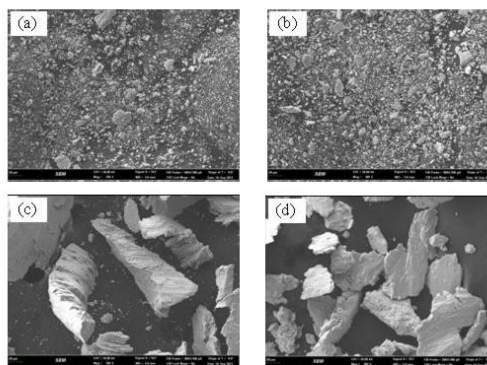


Fig. 9 Wear debris collected during wear test under 10 N loading.

IV. CONCLUSION

Microstructure of AISI440C after quenching, sub-zero treating, and double tempering consisted of tempered martensite, primary carbides, and secondary carbides. The number and size of secondary carbides increased with tempering temperature. Wear rate of AISI440C increased with an increase of pin tempering temperature. In the test where pin and disc had the same hardness of about 42 HRC due to double tempering at 600°C, the highest wear rate was found. In the tests where pins had higher hardness than 42 HRC as a result of lower tempering temperature, wear rates become lower. The higher hardness of pins did not cause severe wear on the softer discs.

ACKNOWLEDGMENT

This work was financially supported by IU/CRC in HDD Component and SIRDC, Khon Kaen University and NECTEC, THAILAND

REFERENCES

- [1] F. G. Caballero, A. Garcia-Junceda, C. Capdevila, and C. Garcia de Andres, "Precipitation of M₂₃C₆ carbides: thermoelectric power measurements," *Scripta Materialia* 52, 2005, pp 501-505.
- [2] C.T. Kwok, K.H. Lo, F.T. Cheng, and H.C. Man, "Effect of processing conditions on the corrosion performance of laser surface-melted AISI 440C martensitic stainless steel," *Surface and Coating Technology* 166, 2003, pp 221-230.
- [3] K.H. Lo, F.T. Cheng, and H.C. Man, "Laser transformation hardening of AISI 440C martensitic stainless steel for higher cavitation erosion resistance," *Surface and Coating Technology* 173, 2003, pp 96-104.
- [4] Fei Yan, Haisheng Shi, Junfei Fan, and Zhou Xu, "An investigation of secondary carbides in the spray-formed high alloyed Vanadis 4 steel during tempering," *Materials Characterization* 59, 2008, pp. 883-889.
- [5] S.H. Salleh, M.Z. Omar, J. Syarif, M.J Ghazali, S. Abdullah and Z. Sajuri (2009). "Investigation of microstructures and properties of 440C martensitic stainless steel," *International Journal of Materials Engineering (IJMME)*, 2009, pp 123-126.
- [6] Debdulal Das, and Kalyan Kumar Ray, "Structure-property correlation of sub-zero treated AISI D2 steel," *Materials Science and Engineering A* 541, 2012, pp. 45-60.
- [7] ASTM Standard G99-05, 2010, "Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010, DOI: 10.1520/G0099-05R10, www.astm.org
- [8] D.Bombac, M. Fazarinc, A Saha Podder, and G. Kugler, "Study of Carbide Evolution During Thermo-Mechanical Processing of AISI D2 Tool Steel," *ASM International*, 2013, pp 742-747.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวดารารัตน์ อาภาจิรสกุล เกิดวันที่ 22 พฤศจิกายน พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดชลบุรี บิดา ชื่อนายนิธิ อาภาจิรสกุล มารดาชื่อนางอารี อาภาจิรสกุล สำเร็จการศึกษาระดับชั้นประถมจาก โรงเรียนเจริญสุขวิทยา จังหวัดชลบุรี ในปีการศึกษา 2541 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษา ตอนต้นจากโรงเรียนเมธีอิมมาคูเลตคอนแวนต์ จังหวัดชลบุรี ในปีการศึกษา 2544 และสำเร็จ การศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนชลราษฎรอำรุง จังหวัดชลบุรี ในปีการศึกษา 2547 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโลหการ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2551

ปีการศึกษา 2552 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ใน ระหว่างการศึกษาได้ทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยสอนในวิชา ปฏิบัติการ โลหการกายภาพ 1 สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ณ สถาบันการศึกษาเดิม (ปีการศึกษา 2553-2554) โดยได้รับทุนการศึกษาแก่นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัยจาก แหล่งทุนภายนอกจากกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และทุน วิจัยเพื่อการศึกษาระดับปริญญาตรี โทและเอก จากศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้านส่วนประกอบ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

โดยมีบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ดังนี้

Dararat Arparjirasakul, Tapany Patcharawit, and Usanee Kitkamthorn. Dry Sliding Wear Characteristics of AISI440C Martensitic Stainless Steel. **International Conference on Advances in Engineering and Technology (ICAET'2014)**; 29-30 March; Singapore. (อยู่ในระหว่างดำเนินการตีพิมพ์)