

พฤติกรรมการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมบนชั้นวาเนเดียมคาร์ไบด์
ที่เคลือบด้วยกระบวนการที่อาร์ดี



นายรัชตพล ฝิวนิม

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ADHESION BEHAVIOR OF STAINLESS STEEL ON VANADIUM CARBIDE
COATED BY TRD PROCESS

Mr.Rachatapol Piewnim



ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Metallurgical Engineering
Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

พฤติกรรมและการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมบนชั้นวานาเดียม-คาร์ไบด์ที่เคลือบด้วยกระบวนการที่อาร์ดี

โดย

นายรัชตพล ผิวนิม


สาขาวิชา

วิศวกรรมโลหการ

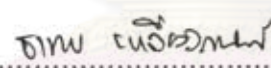
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย

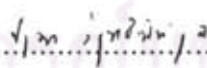
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนირงวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธัชชาย เหลืองวรานันท์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐมมา วิสุทธิพิทักษ์กุล)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ชินะ เพ็ญชาติ)

รัชพล ผิวนิยม : พฤติกรรมการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมบนชั้นวานาเดียมคาร์ไบด์ที่เคลือบด้วยกระบวนการที่อาร์ดี. (Adhesion behavior of Stainless steel on Vanadium Carbide coated by TRD process) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย , 52 หน้า

เหล็กกล้าไร้สนิมออกเทนนิติกมีแนวโน้มที่จะเกาะติดบนเหล็กกล้าเครื่องมือซึ่งใช้เป็นเครื่องมือขึ้นรูป จึงขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออกเทนนิติกยากมาก การเคลือบแข็งบนเหล็กกล้าเครื่องมือเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยลดปัญหาการเกาะติด งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมออกเทนนิติกที่โดลกับชั้นวานาเดียมคาร์ไบด์ที่เคลือบด้วยกระบวนการที่อาร์ดี การทดสอบการโดลกระทำในเงื่อนไขที่ไม่ใช้สารหล่อลื่นที่อุณหภูมิห้องด้วยเครื่องทดสอบแบบ ring-on-disc ใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 เป็นวงแหวนสำหรับโดลคู่กับชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ ใช้เหล็กกล้า DC53 เป็นดิสก์ซึ่งเคลือบชั้นวานาเดียมคาร์ไบด์ แปรผันแรงกดและความเร็วการโดลในช่วง 120 - 320 นิวตันและ 0.716 - 2.148 เมตร/วินาทีตามลำดับ ตรวจสอบผิวสัมผัสการโดลด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด วิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีที่ผิวของแหวนด้วยเครื่อง SEM-EDS

พบว่าน้ำหนักที่สูญเสียไปของแหวนเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อเพิ่มแรงกดจาก 120 นิวตัน ถึง 220 นิวตัน น้ำหนักที่สูญเสียไปเพิ่มขึ้นอย่างกะทันหันเมื่อแรงกดเพิ่มขึ้นเป็น 320 นิวตัน ผลวิเคราะห์ SEM-EDS ที่ผิวของวงแหวนที่แรงกด 320 นิวตันหลังการทดสอบแสดงออกซิเจนสะสมอยู่มากกว่าวงแหวนที่ยังไม่ได้ทดสอบ ออกไซด์ที่ผิววงแหวนอาจจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์ด้วย XPS อาจบอกเป็นนัยว่าปริมาณออกไซด์ของโครเมียมและออกไซด์ของเหล็กที่แตกต่างกันอาจเป็นสาเหตุของการเกาะติดของเนื้อเหล็กวงแหวน กรณีแปรผันความเร็วการโดล น้ำหนักที่สูญเสียไปของเหล็กกล้าไร้สนิมค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามความเร็วการโดลที่เพิ่มขึ้นจาก 0.716 จนถึง 2.148 เมตร/วินาที

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ ลายมือชื่อนิสิต รัชพล ผิวนิยม
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
ปีการศึกษา 2552

4970527921 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS : ADHESION / STAINLESS STEEL / VANADIUM CARBIDE / TRD PROCESS

RACHATAPOL PIEWNIM: ADHESION BEHAVIOR OF STAINLESS STEEL ON VANADIUM CARBIDE COATED BY TRD PROCESS. THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF. PRASONK SRICHAROENCHAI, D.Eng., 52 pp.

Austenitic stainless steel is prone to adhere on tool steels which are used as forming tool. This causes austenitic stainless steel very difficult to form. Hard coating on the forming tools is a method to alleviate adhesion problems. In this work, adhesion behavior of austenitic stainless steel was tested against VC coated by thermo-Reactive Deposition and diffusion (TRD) process. Sliding wear test is conducted under the un-lubricated condition at room temperature by a ring-on-disc tester. AISI 304 is used as a ring for sliding couple with VC coating layer. DC 53 steel is used as a disc. Normal load and sliding velocity were varied in range of 120 – 320 N and 0.716 – 2.148 m/s respectively. Sliding contact was investigated by optical microscope and scanning electron microscope (SEM). Chemical composition of the ring surface was identified by SEM-EDS.

It is found that weight loss of the ring increases gradually with increasing normal load from 120 N till 220 N then increase abruptly till load is 320 N. EDS analysis of ring surface for 320 N load shows that ring tested surface contains more oxygen content than that without wear testing. Oxide thickness at ring surface may be increased. of XPS analysis, result implies that different amount of Cr-oxide and Fe-oxide on the ring surface contributes to adhesion. In case of varying sliding velocity, weight loss of stainless steel ring gradually increases from sliding velocity of 0.716 m/s till 2.148 m/s.

Department: Metallurgical Engineering Student's Signature: *Rachatapol Piewnim*
Field of Study:..... Metallurgical Engineering Advisor's Signature: *Prasong Sricharoenchai*
Academic Year: 2009

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย เป็นอย่างสูงสำหรับการถ่ายทอดความรู้ อบรมสั่งสอน ตลอดจนให้กำลังใจและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ทั้งในด้านการเรียนและการทำงาน ขอขอบพระคุณประธานและคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.ธัชชาย เหลืองวรรณันท์, ดร.ปฐมมา วิสุทธิพิทักษ์กุล, ดร. ชินะ เพ็ญชาติ รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมให้ความรู้ในงานด้านโลหะวิทยาอีกทั้งคำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ในภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้การสนับสนุนข้าพเจ้าในทุกด้านด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณบริษัทไทยปาร์คเกอร์ไรซิง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง Friction wear tester EFM III-1010, X-ray photoelectron spectroscopic (XPS) และเครื่องซิงดิจิตอล ขอขอบคุณคุณวณภรณ์ คณิตนันท์รักษ์ (Manager) และคุณพาติศ กงตาล (R&D Officer) ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องทดสอบและวิเคราะห์ชิ้นงานด้วยเครื่อง XPS ขอขอบคุณภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง EPMA และขอบคุณคุณไศภิต พุ่มพวง ที่ช่วยวิเคราะห์ชิ้นงานด้วยเครื่อง EPMA จนงานวิจัยสำเร็จด้วยดี

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาอันเป็นที่เคารพรักที่คอยให้กำลังใจอีกทั้งการสนับสนุนด้านการศึกษาและให้โอกาสที่ดีในชีวิตแก่ข้าพเจ้าด้วยดีตลอดมา รวมทั้งเพื่อนในกลุ่มวิจัยที่เป็นกำลังใจให้กับข้าพเจ้า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ลักษณะการเกาะติด.....	3
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการสูญเสียเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม.....	4
2.3 การเกาะติดบนชั้นเคลือบและอิทธิพลของออกไซด์ที่ผิวสัมผัสการไหล.....	7
3 ขั้นตอนการทดลอง.....	14
3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	14
3.2 การเตรียมดิสก์และเคลือบด้วยกระบวนการที่อาร์ดี.....	14
3.3 ศึกษาพฤติกรรมการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิม.....	14
3.4 ตรวจสอบวิเคราะห์ผิววงแหวนและผิวดิสก์บริเวณที่เกิดการเกาะติดหลังการทดสอบ.....	15
3.5 เงื่อนไขการทดลอง.....	15
4 ผลและการอภิปราย.....	22
4.1 แปรผันระยะทางการไหลที่แรงกดและความเร็วการไหลคงที่.....	22
4.2 การแปรผันแรงกดที่ความเร็วคงที่.....	25
4.3 การแปรผันความเร็วการไหลที่แรงกดคงที่.....	40

บทที่	หน้า
5 สรุป.....	45
รายการอ้างอิง.....	46
ภาคผนวก.....	47
ภาคผนวก ก.....	48
ภาคผนวก ข.....	50
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	52



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอมของธาตุบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการให้ความร้อน ณ อุณหภูมิต่าง ๆ เปรียบเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน.....	12
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการทดลองเพื่อหาการสูญเสียเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมที่ความเร็ว และแรงกดค่าต่างๆ	16
ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC53 (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก).....	17
ตารางที่ 3.3 ขอบเขตการใช้งานเครื่องทดสอบการเกาะติด (Friction Wear Tester EFM III-1010)	20
ตารางที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ของแรงส่งกำลังเครื่องทดสอบ กับความเร็วการไถล และสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน.....	20
ตารางที่ 4.1 ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM-EDS.....	29
ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์สารประกอบออกไซด์ที่ผิววงแหวนด้วยเครื่อง XPS.....	30
ตารางที่ ก.1 อัตราส่วนโดยอะตอมสำหรับองค์ประกอบทางเคมี จากเงื่อนไขการทดลอง โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง.....	48

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงการเกาะติดที่ผิวหน้าชั้นฟิล์มและชั้นฟิล์มที่ถูกทำลายไป มีผลให้เนื้อโลหะไหลสัมผัสกันโดยตรงและยึดติดกัน	3
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของการสูญเสียเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม กับระยะเวลาการไหลที่แรงกดต่างๆ	4
รูปที่ 2.3 X-ray pattern ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ก่อนทดสอบ ที่แรงกด 200 นิวตัน และ 300 นิวตัน	5
รูปที่ 2.4 ภาพตัดขวางของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมจาก SEM แสดงรอยแตก บริเวณใต้ผิวสัมผัสการไหลซึ่งเกิดการและการแปรรูปแบบพลาสติก.....	6
รูปที่ 2.5 Specific wear rate ของเหล็กกล้าไร้สนิมที่สูญเสียไปกับเวลาที่ใช้ในการไหล ภายใต้เงื่อนไขการแปรผันความเร็วและแรงกด	6
รูปที่ 2.6 ผลวิเคราะห์ธาตุบนชิ้นงานชั้นเคลือบไทเทเนียมไนตรายด์ ที่ไหลบนเหล็กกล้าไร้สนิมโดยให้แรงกด 300 นิวตันและ 600 นิวตัน.....	7
รูปที่ 2.7 เหล็กกล้าไร้สนิมเกาะติดบนชั้น wc/c เมื่อให้แรงกด 800 นิวตันและ 1000 นิวตัน	8
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวกับแรงกดเมื่อเริ่มเกิดการเกาะติด ที่แรงกด Lc1 และการเกาะติดปกคลุมผิวที่แรงกดเพิ่มขึ้น (Lc2)	9
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับเวลาการไหล ของดิสก์ชุบแข็ง ชั้นวาเดียมคาร์ไบด์และชั้นวาเนเดียมไนโอเบียมคาร์ไบด์.....	10
รูปที่ 2.10 จาก SEM แสดงการเกาะติดของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม บนชิ้นงานดิสก์ชุบแข็ง.....	10
รูปที่ 2.11 แสดงรอยต่อระหว่างชั้นไทเทเนียมไนตรายด์กับเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม ที่หลุดมาเกาะติด.....	11
รูปที่ 2.12 ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง ESCA ลึกลงผิวเหล็กกล้าไร้สนิม ก่อนการทดสอบและหลังจากให้ความร้อนที่ 200°C, 500°C และ 800°C.....	12
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดสอบการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมบนชั้นวาเนเดียมคาร์ไบด์.....	17
รูปที่ 3.2 แบบดิสก์เหล็ก DC53 เป็นชิ้นงานเคลือบแข็งผิวมีความหนา 5 มม.....	18
รูปที่ 3.3 แบบวงแหวนเหล็กกล้าไร้สนิม	18

รูปที่ 3.4 แนวเจาะรูเสียบเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิขณะทำการทดสอบการเกาะติด.....	19
รูปที่ 3.5 แบบจำลองแสดงการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน.....	19
รูปที่ 3.6 แสดงการวางชิ้นงานบนเครื่องทดสอบแบบ Ring-On-Disc	21
รูปที่ 3.7 แบบเครื่องทดสอบ	21
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมที่สูญเสียไปกับระยะทางการไถล.....	22
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับระยะทางการไถล.....	23
รูปที่ 4.3 แสดงแนวตัดตั้งฉากกับผิววงแหวนและการเปลี่ยนแปลงที่ผิววงแหวน.....	23
รูปที่ 4.4 รอยแตกใต้ผิววงแหวนตรงหัวลูกศร	24
รูปที่ 4.5 ตรงหัวลูกศรแสดงชั้นออกไซด์ปกคลุมตลอดผิวสัมผัสการไถล ของวงแหวนและวงรีแสดงบริเวณที่เนื้อวงแหวนสูญเสียไป	24
รูปที่ 4.6 การสูญเสียเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมที่แรงกดต่างๆ.....	25
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับเวลาการไถล ที่แรงกดต่างๆและแสดงน้ำหนักที่สูญเสียไปของเหล็กกล้าไร้สนิม.....	27
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับเวลาการไถล ที่แรงกด 320 N และแสดงน้ำหนักที่สูญเสียไปของเหล็กกล้าไร้สนิม	28
รูปที่ 4.9 แบบจำลองแสดงปริมาณออกไซด์จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM-EDS.....	29
รูปที่ 4.10 วิเคราะห์ออกไซด์ของโครเมียมบนผิววงแหวนก่อนการทดสอบด้วยเครื่อง XPS.....	31
รูปที่ 4.11 วิเคราะห์ออกไซด์ของเหล็กบนผิววงแหวนก่อนการทดสอบด้วยเครื่อง XPS.....	31
รูปที่ 4.12 วิเคราะห์ออกไซด์ของโครเมียมบนผิววงแหวนที่ ระยะไถลการไถล 576 m ด้วยเครื่อง XPS.....	32
รูปที่ 4.13 วิเคราะห์ออกไซด์ของเหล็กบนผิววงแหวน ที่ระยะไถลการไถล 576 m ด้วยเครื่อง XPS.....	32
รูปที่ 4.14 วิเคราะห์ออกไซด์ของโครเมียมบนผิววงแหวน ที่ระยะไถลการไถล 2,000 m ด้วยเครื่อง XPS.....	33
รูปที่ 4.15 วิเคราะห์ออกไซด์ของเหล็กบนผิววงแหวน ที่ระยะไถลการไถล 2,000 m ด้วยเครื่อง XPS.....	33
รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงที่ผิวสัมผัสการไถลของวงแหวนที่ระยะทางการไถล 576 เมตรและการแปรรูปแบบพลาสติก.....	34
รูปที่ 4.17 ผลวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EPMA ที่ผิววงแหวนบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลง.....	35
รูปที่ 4.18 เนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเกาะติดบนชิ้นงานเดียมคาร์ไบด์ที่หยุดที่ระยะทางต่างๆ	37

รูปที่ 4.19 รูปจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาดกำลังขยาย 120 เท่าแสดง บริเวณที่เหล็กกล้าไร้สนิมเกาะติดบนชั้นเคลือบที่ระยะทางการไหล 576 เมตร	38
รูปที่ 4.20 วิเคราะห์ธาตุด้วยเครื่อง EPMA บริเวณที่เกิดการเกาะติดบนชั้นเคลือบ	39
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมที่สูญเสียไปที่ความเร็วต่างๆ.....	41
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเหล็กกล้าไร้สนิมกับเวลาที่ความเร็วต่างๆ.....	42
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายกับเวลาที่ความเร็วต่างๆ และแสดงน้ำหนักที่สูญเสียไปของเหล็กกล้าไร้สนิม.....	43
รูปที่ ก.1 กราฟความสัมพันธ์ของเนื้อชั้นเคลือบที่สูญเสียไปเมื่อ ความเร็วการไหลเพิ่มขึ้นที่แรงกดคงที่.....	49
รูปที่ ก.2 เนื้อของชั้นเคลือบผิวแข็งที่สูญเสียไปเมื่อแรงกดมีค่าเพิ่มขึ้นโดยให้ความเร็วการไหลคงที่..	49
รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเหล็กกล้าไร้สนิมกับระยะทางการไหล	50
รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเหล็กกล้าไร้สนิมกับเวลาการไหลที่แรงกดต่างๆ	50
รูปที่ ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเหล็กกล้าไร้สนิมกับเวลาที่ความเร็วการไหลต่างๆ...	50

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมต้องการใช้แม่พิมพ์ตัดและขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นจำนวนมาก เป็นที่ทราบกันว่าแม่พิมพ์ดังกล่าวมีราคาสูงจึงมีการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลที่ผิวของแม่พิมพ์ให้มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น โดยใช้เหล็กกล้าเครื่องมือที่มีความแข็งสูงด้วยการชุบแข็งและอบคืนตัว โดยทำให้แม่พิมพ์มีความต้านทานการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมได้ดีขึ้น แต่การเกาะติดยังคงเกิดขึ้นได้ จึงมีความพยายามที่จะคิดค้นและพัฒนาวิธีการปรับปรุงพื้นผิววัสดุของแม่พิมพ์ขึ้นรูปและแม่พิมพ์ตัดให้มีความต้านทานการเกาะติดและทนทานต่อแรงกระแทกได้ดีขึ้น

ชั้นเคลือบคาร์ไบด์ที่เคลือบด้วยกระบวนการ TRD [1] เป็นชั้นเคลือบประเภทหนึ่ง ที่ลดการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมออกเทนนิติก ซึ่งเป็นที่ทราบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออกเทนนิติกมีความเหนียวและเกาะติดได้ดี แม้ว่าชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์จะสามารถลดความรุนแรงของการเกาะติดลงได้แต่การเกาะติดยังคงเกิดขึ้นได้ การศึกษาพฤติกรรมของการเกาะติดของเหล็กกล้า-ไร้สนิมออกเทนนิติกซึ่งใกล้เคียงกับชั้นวาเนเดียมคาร์ไบด์จึงมีความสำคัญ เพื่อจะสามารถเข้าใจพฤติกรรมการเกาะติดที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสการไหลภายใต้ภาระแรงกระทำที่เปลี่ยนแปลงไป และหาวิธีการเพื่อลดการเกาะติดให้ลดลง

ดังนั้นการศึกษาให้เข้าใจถึงพฤติกรรมการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมออกเทนนิติกจึงนับว่ามีความสำคัญเพื่อช่วยลดการเกาะติดและช่วยยืดอายุการใช้งานเหล็กกล้าเครื่องมือ อีกทั้งช่วยภาคการผลิตในระดับอุตสาหกรรมให้สามารถลดต้นทุนเพิ่มโอกาสในการแข่งขันทางธุรกิจ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมออกเทนนิติกบนวาเนเดียมคาร์ไบด์ซึ่งเคลือบด้วยกระบวนการ TRD

1.2.2 ศึกษาผลของตัวแปร ได้แก่ ระยะทางการไหล แรงกด ความเร็วการไหล ที่มีผลต่อพฤติกรรมการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมออกเทนนิติกที่ใกล้เคียงกับชั้นวาเนเดียมคาร์ไบด์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ทำการศึกษาพฤติกรรมการเกาะติดที่เกิดบนชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ซึ่งผ่านกระบวนการ TRD ด้วยเครื่องทดสอบแบบ Ring-On-Disc ผิวสัมผัสเป็นแบบแห้ง ทดสอบที่อุณหภูมิห้องภายใต้ความดันบรรยากาศ โดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 เป็นคู่สัมผัสการไถลกับชั้นวานาเดียมคาร์ไบด์

1.3.2 ศึกษาผิวชั้นเคลือบหลังการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงค่าตัวแปรที่ใช้ทดสอบซึ่งมีผลต่อการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมบนชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์

1.4.2 ทราบถึงปัญหาจากการศึกษาการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมบนเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC53 ที่เคลือบผิวด้วยวานาเดียมคาร์ไบด์โดยกระบวนการ TRD

1.4.3 สามารถนำข้อมูลที่ได้มาประยุกต์เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพิจารณาการใช้งานชั้นวานาเดียมคาร์ไบด์เพื่อขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2

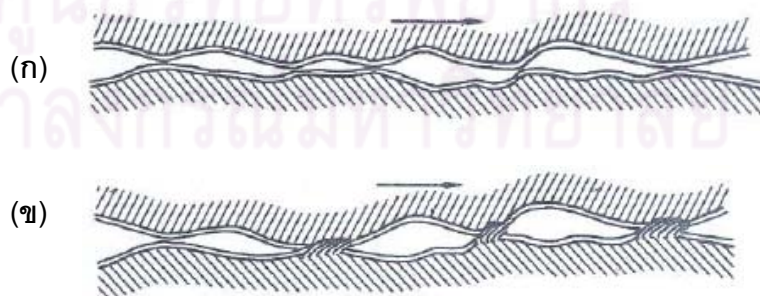
ปริทรรศน์วรรณกรรม

การเกาะติดมักพบบ่อยในการขึ้นรูปชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งเกาะติดได้ง่ายหรือเกิดการส่งถ่ายเนื้อโลหะจากผิวสัมผัสหนึ่งสู่อีกผิวสัมผัสหนึ่ง โดยเฉพาะเงื่อนไขการไหลแบบแห้ง ซึ่งเป็นปัญหาสำหรับเหล็กกล้าเครื่องมือที่ใช้ขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมเช่นแม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะแผ่น แม่พิมพ์ตัดชิ้นงาน ลูกรีดงานรีดเย็น เป็นต้น การเกาะติดทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานเหล็กกล้าเครื่องมือแยกลง

2.1 ลักษณะเกาะติด (adhesion)

การไหลของคู่สัมผัสแบบแห้งความรุนแรงของความเสียหายมักเกิดขึ้นจากการเกาะติดซึ่งการเกาะติดขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้คือ โครงสร้างจุลภาคของผิวสัมผัสทั้งสองหน้าที่สัมผัสกัน โครงสร้างของวัสดุพื้น (substrate) การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของผิวหน้า แรงกระทำ ณ บริเวณจุดสัมผัสและสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้นในบรรยากาศการไหล [2]

พื้นที่ผิวทางวิศวกรรมไม่มีพื้นผิวที่เรียบจริงและการไหลทำให้บริเวณผิวส่วนที่นูน (asperity) ไหลสัมผัสกันซึ่งทำให้อุณหภูมิที่ผิวสัมผัสการไหลสูงขึ้นแล้วเนื้อโลหะเชื่อมติดในสภาพของแข็งจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วฉีกออกเนื่องจากแรงเฉือนโดยเนื้อที่ผิวสัมผัสหนึ่งหลุดไปเกาะติดกับอีกผิวสัมผัสหนึ่ง พื้นที่ส่วนที่นูนเกิดการแปรรูปแบบพลาสติกเนื่องจากแรงกดที่มากระทำจนฟิล์มออกไซด์ของผิวโลหะถูกทำลายไปและเนื้อเหล็กสัมผัสกันโดยตรงเกิดการยึดติด [3] แสดงในรูปที่ 2.1 และผิวของโลหะที่มีความแข็งต่ำกว่าจะหลุดไปเกาะติดกับผิวที่มีความแข็งสูงกว่า เช่น กรณีของโลหะไหลกับเซรามิกหรือชั้นเคลือบผิวแข็ง

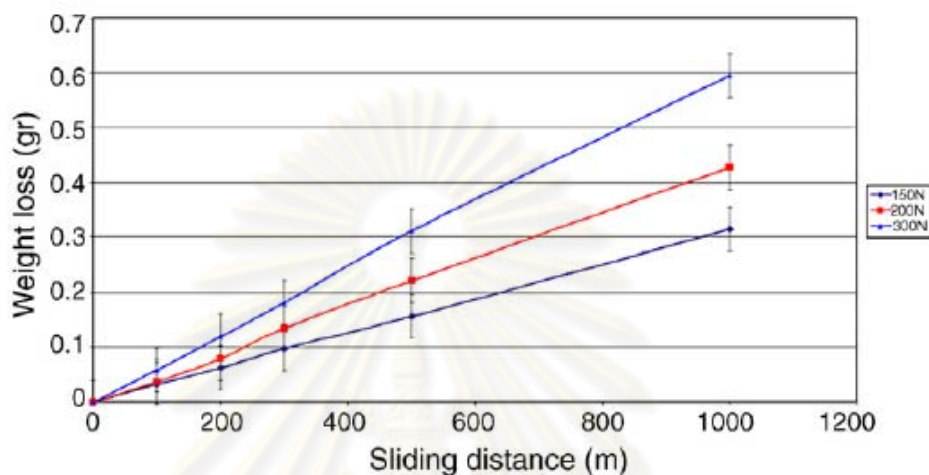


รูปที่ 2.1 แสดงการเกาะติด (ก) การไหลเกิดขึ้นระหว่างผิวหน้าชั้นฟิล์ม

(ข) ชั้นฟิล์มที่แตกออกมีผลให้เนื้อที่ผิวของโลหะไหลสัมผัสกันโดยตรงและยึดติดกัน [3]

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการสูญเสียเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม

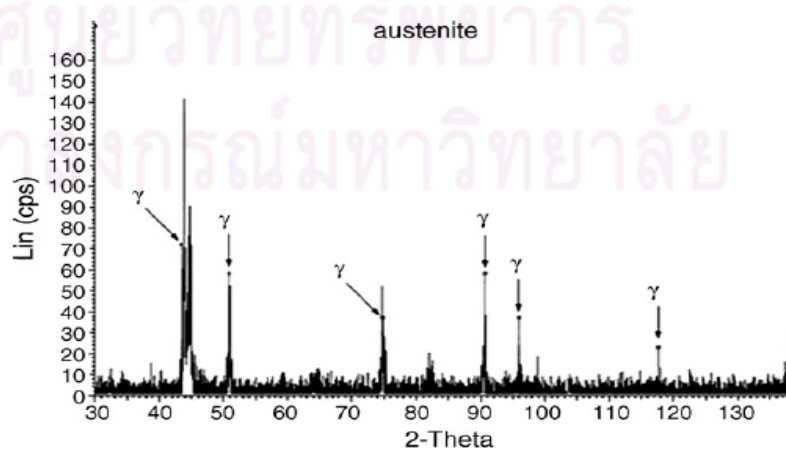
Morteza Zandrahimi, M. Reza bateni, A. Poladi, Jerzy A. Szpunar [4] ศึกษาการไถลของ AISI 52100 (pin) \varnothing 5 มม. บน AISI 304(disc) ด้วยเครื่องทดสอบแบบ pin-on-disc ที่ความเร็วการไถล 0.01 เมตรต่อวินาที แรงกด 100, 200 และ 300 นิวตัน พบว่าเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมสูญเสียไปเพิ่มขึ้นตามแรงกดที่เพิ่มสูงขึ้นแสดงในรูปที่ 2.2



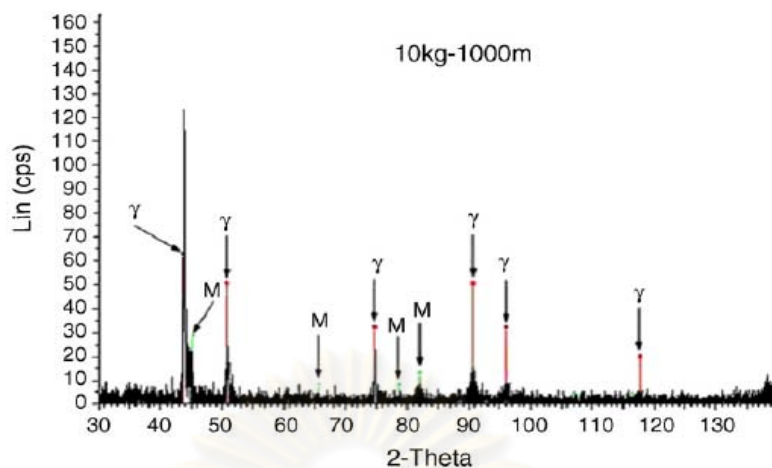
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของการสูญเสียเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมกับระยะทางที่แรงกดต่างๆ, [4]

วิเคราะห์ผิวสัมผัสการไถลด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) พบว่าแรงกดมีผลให้เหล็กกล้าไร้สนิมเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสจากออสเตไนต์เป็นมาร์เทนไซต์บางส่วนและเฟสมาร์เทนไซต์มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามแรงกดที่เพิ่มขึ้นบนเนื้อพื้นออสเตไนต์แสดงในรูปที่ 2.3

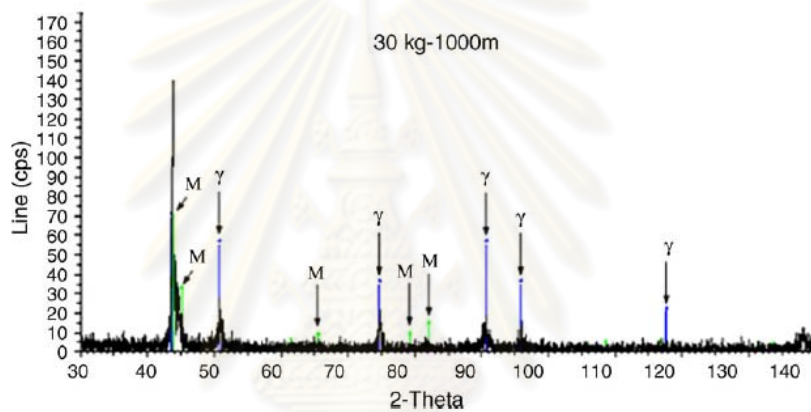
(ก)



(ข)



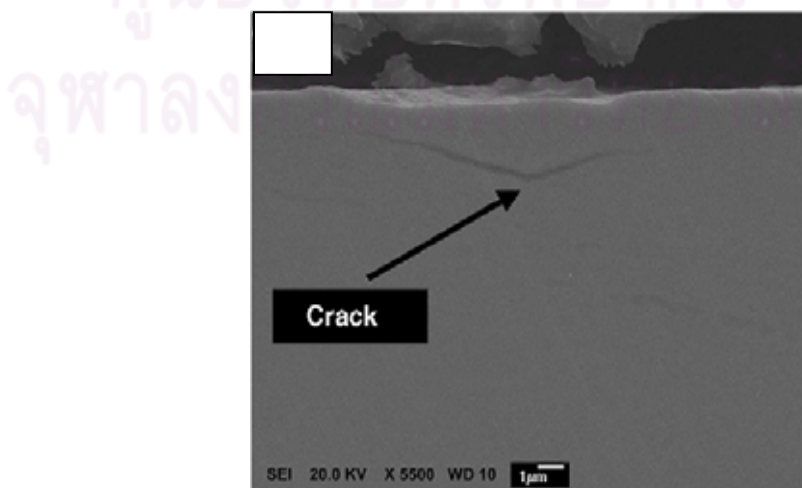
(ค)

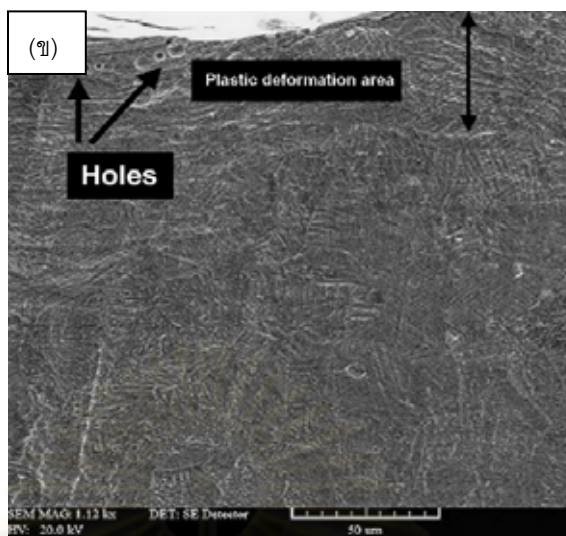


รูปที่ 2.3 X-ray pattern ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 (ก) ก่อนทดสอบ

(ข) แรงกด 200 N (ค) แรงกด 300 N, [4]

ลึกลงไปจากผิวการไหลของเหล็กกล้าไร้สนิมพบรอยแตก รูปครุณและการแปร-
รูปแบบพลาสติกใต้ผิวการไหลแสดงในรูปที่ 2.4

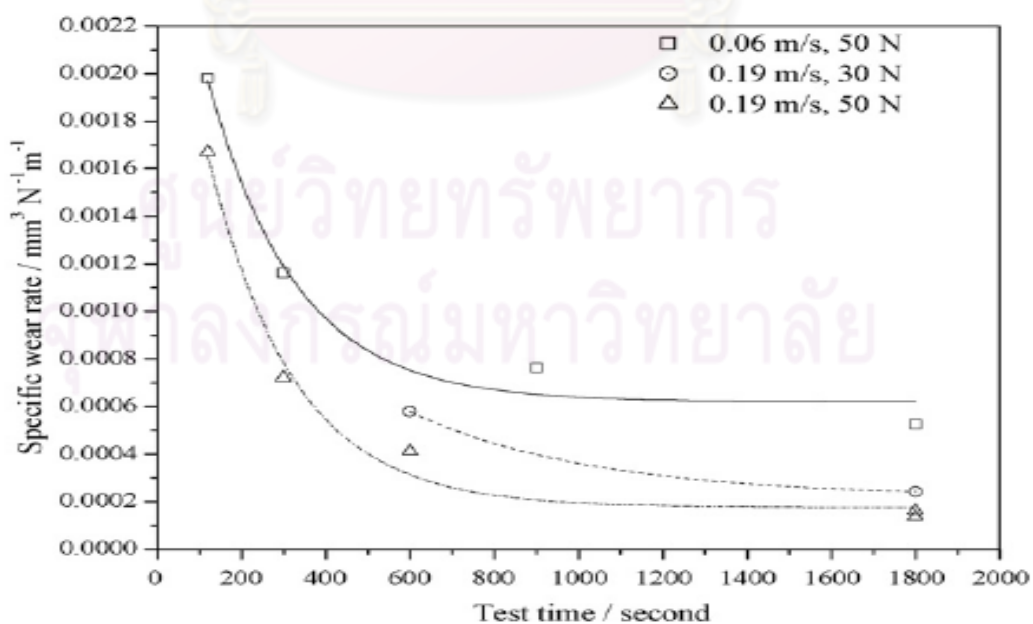




รูปที่ 2.4 ภาพตัดขวางของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมจากSEM (ก) รอยแตก

(ข) การแปรรูปแบบพลาสติก [4]

Meng Hua, Xicheng Wei, Jian Li [5] ศึกษาพฤติกรรมเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 (disc) กับ Al_2O_3 (ceramic ball) ทดสอบแบบ ball-on-disc โกลโดยใช้สารหล่อลื่นภายใต้ความดันบรรยากาศ ใช้แรงกดในช่วง 10-50 นิวตันและความเร็วการโกลในช่วง 0.06-0.19 เมตร/วินาทีแสดงในรูปที่ 2.5

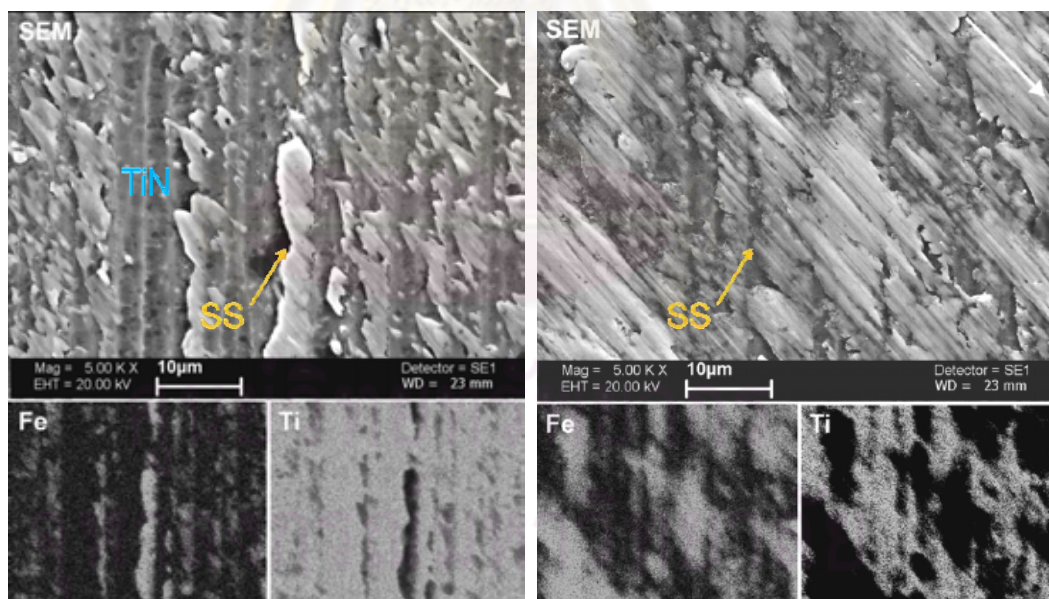


รูปที่ 2.5 Specific wear rate ของเหล็กกล้าไร้สนิมที่สูญเสียไปกับเวลาที่ใช้ในการไถลภายใต้เงื่อนไขการแปรผันความเร็วและแรงกด [5]

พบว่าค่า Specific wear rate ลดลงตามเวลาการไถลที่เพิ่มขึ้นและที่แรงกด 50 นิวตันตั้งแต่เวลาการไถล 1,000 วินาที Specific wear rate มีค่าคงที่ อาจเป็นไปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงที่ได้ผิวการไถลของเหล็กกล้าไร้สนิมจากเฟสออสเทนไนท์ (γ) เป็นเฟสมาร์เทนไซต์ (α') บางส่วนเพิ่มขึ้นตามระยะทางการไถลที่เพิ่มสูงขึ้น เหล็กกล้าไร้สนิมบริเวณใต้ผิวการไถลจึงมีความแข็งเพิ่มขึ้นซึ่งต้านทานการเกาะติดได้ดีขึ้น

2.3 การเกาะติดบนชั้นเคลือบและอิทธิพลของอ็อกไซด์ที่ผิวสัมผัสการไถล

B. Podgornik, S. Hogmark, and O. Sandberg [6] ศึกษาพฤติกรรมการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมโดยชั้นไทเทเนียมไนไตรด์เป็นคู่สัมผัสการไถล ทดสอบด้วยเครื่อง Load scanner วิเคราะห์ผิวการไถลด้วยเครื่อง Energy dispersive electron spectroscopy (EDS) พบว่าการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมมีลักษณะการเกาะติดซ้อนทับในบริเวณที่มีการเกาะติดเดิมแล้วการเกาะติดขยายออกไปยังบริเวณรอบ ๆ ที่แรงกดเพิ่มสูงขึ้นแสดงในรูปที่ 2.6



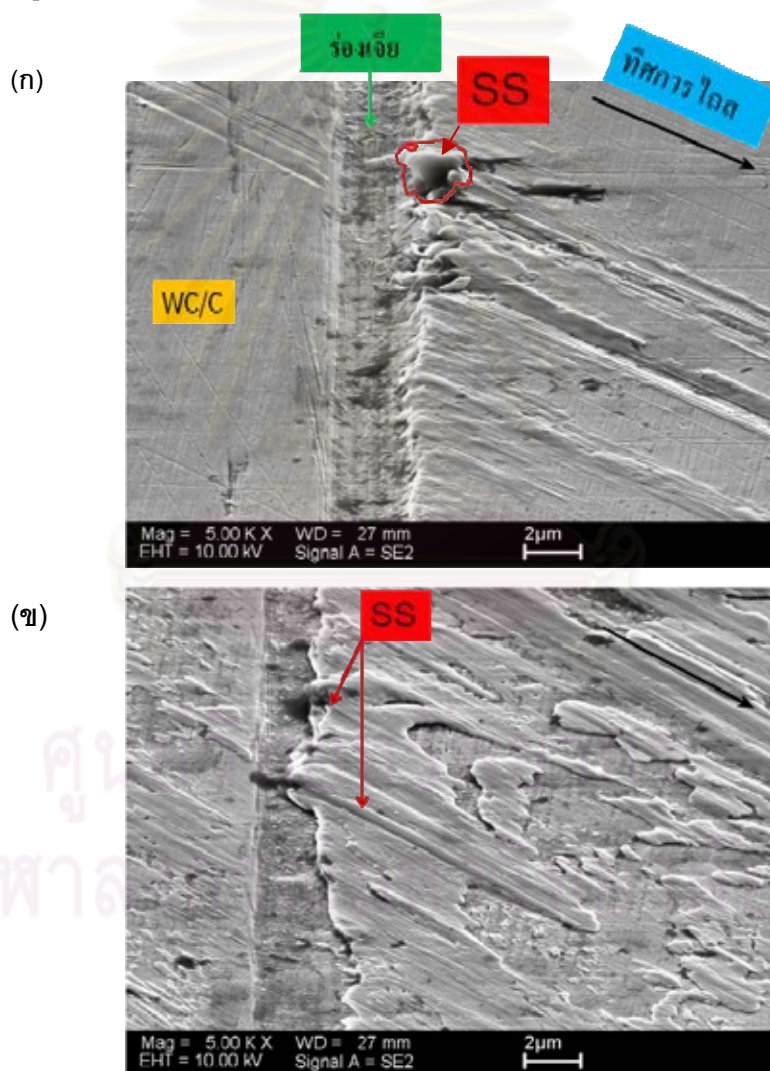
(ก) 300 N

(ข) 600 N

รูปที่ 2.6 ผลวิเคราะห์ธาตุบนชั้นไทเทเนียมไนไตรด์ที่ไถลคู่กับเหล็กกล้าไร้สนิมที่แรงกด (ก) 300 N และ (ข) 600 N [6]

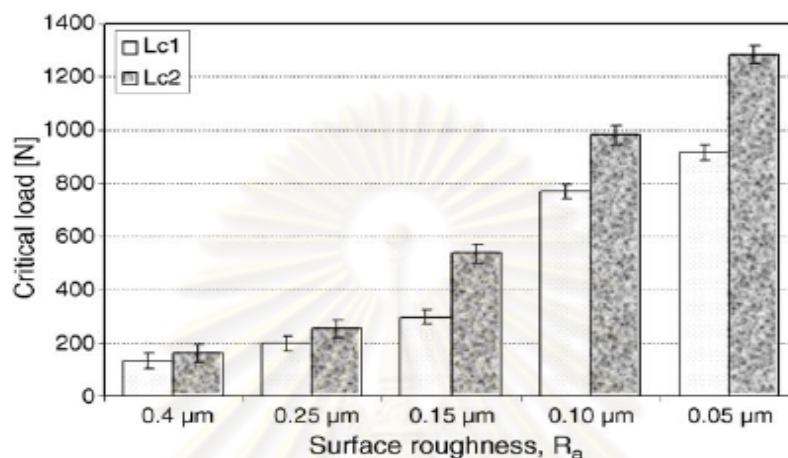
การเกาะติดเป็นกระบวนการเชื่อมติดกันภายใต้สภาวะของแข็ง (solid – phase welding process) และเป็นที่ทราบทั่วกันว่าเหล็กกล้าไร้สนิมมีแนวโน้มเกิดการเกาะติดกับเหล็กเครื่องมือได้ง่ายเพราะเหล็กกล้าไร้สนิมมีคุณสมบัติเหนียว

B. Podgornik S. Hogmark O. Sandberg [6], [7] ศึกษาเกี่ยวกับการเกาะติดที่เริ่มเกิดขึ้นบนผิวเหล็กกล้าเครื่องมือซึ่งได้ปรับปรุงผิวโดยการชุบแข็ง (hardening) กระบวนการพลาสมาไนไตรดิงและการเคลือบ (coating) อีกทั้งยังปรับปรุงความหยาบผิว (roughness) โดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นคู่สัมผัสการไถ ซึ่งการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมเริ่มเกิดขึ้นตรงขอบคมของร่องเจียบนเหล็กกล้าเครื่องมือและเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเกาะติดสะสมเพิ่มขึ้นเมื่อให้แรงกดสูงขึ้น แสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เหล็กกล้าไร้สนิมเกาะติดบน wc/c เมื่อให้แรงกด ก) 800 N ข) 1000 N [7]

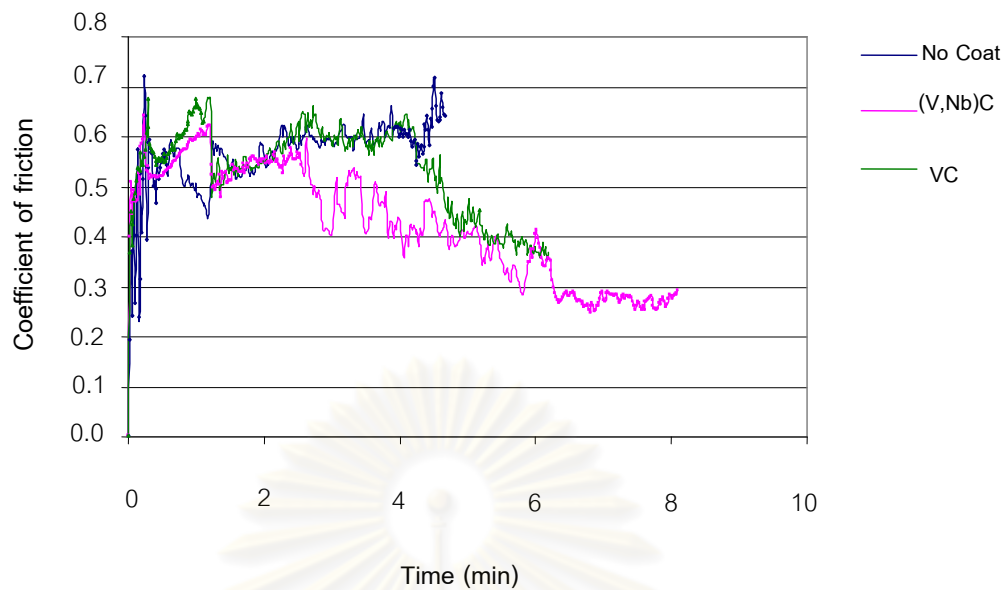
ทดสอบการเกาะติดโดยใช้เหล็กเครื่องมือ VANADIS 6 โกลคู่กับเหล็กกล้าไร้สนิมแบบไม่ใช้สารหล่อลื่นภายใต้ความดันบรรยากาศด้วยเครื่อง Load scanner พบว่าความหยาบผิวสูง 0.4 – 0.25 ไมครอนจะเกิดการเกาะติดบนผิวสัมผัสการโกลตั้งแต่แรงกดต่ำๆ (Lc1) และเกาะติดปกคลุมทั่วผิวโลหะที่แรงกดสูง (Lc2) ความหยาบผิว 0.15, 0.10 และ 0.05 ไมครอนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานการเกาะติดได้ แสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวกับแรงกดเมื่อเริ่มเกิดการเกาะติดที่แรงกด Lc1 (กราฟแท่งสีขาว) และการเกาะติดปกคลุมผิวที่แรงกด Lc2 (กราฟแท่งสีดำ) [7]

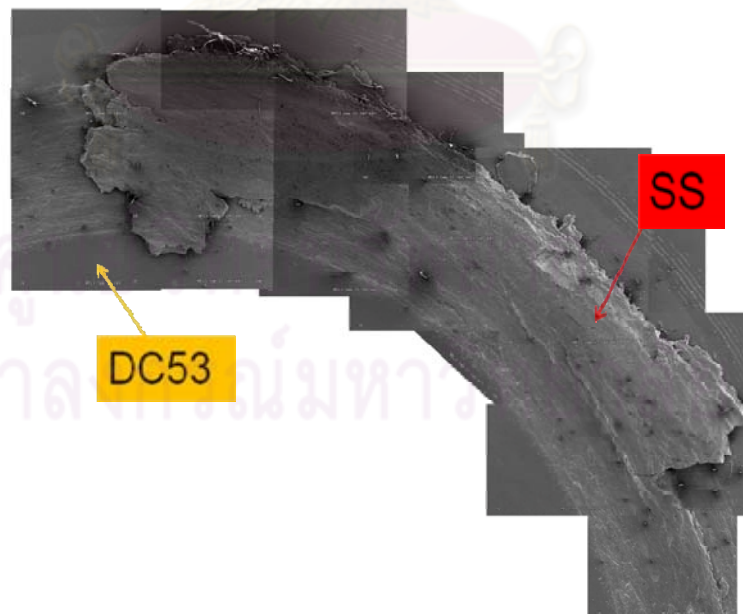
ความหยาบผิวของเหล็กกล้าคาร์บอน 0.4 ไมครอนและ 0.25 ไมครอนเกิดการเกาะติดปกคลุมที่ผิวโลหะเมื่อให้แรงกด 180 นิวตันและ 250 นิวตัน ความหยาบผิว 0.15 ไมครอน การเกาะติดปกคลุมที่ผิวโลหะที่แรงกดสูง (Lc2) เกือบ 600 นิวตัน ดังนั้นความหยาบผิว (R_a) ที่เหมาะสมควรต่ำกว่า 0.15 ไมครอนจึงต้านทานการเกาะติดได้ดี

دنۇفل ئەئوئىتىۋىڭس [8] ศึกษาการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมที่โกลบนชิ้นงานชุบแข็ง ชิ้นวานาเดียมคาร์ไบด์และชิ้นวานาเดียม-ไนโอเบียมคาร์ไบด์ ทดลองให้ความเร็วรอบการหมุนวงแหวนเริ่มต้น 100 รอบต่อนาที แล้วเพิ่มขึ้นอีกนาทีละ 300 รอบต่อนาที โดยมีแรงกด 500 นิวตัน แสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับเวลาการไถลของ ดิสก์ชุบแข็ง ชั้นวานเดียมคาร์ไบด์และชั้นวานเดียมไนโอเบียมคาร์ไบด์, [8]

ที่เวลาการไถลเกือบ 5 นาทีพบว่า เหล็กชุบแข็งมีเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเกาะติดที่ผิวหนา กว่าชั้นวานเดียมคาร์ไบด์และวานเดียม-ไนโอเบียมคาร์ไบด์ โดยเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเกาะ ติดชั้นงานดิสก์ชุบแข็งหนา 430 ไมครอน แสดงในรูปที่ 2.10

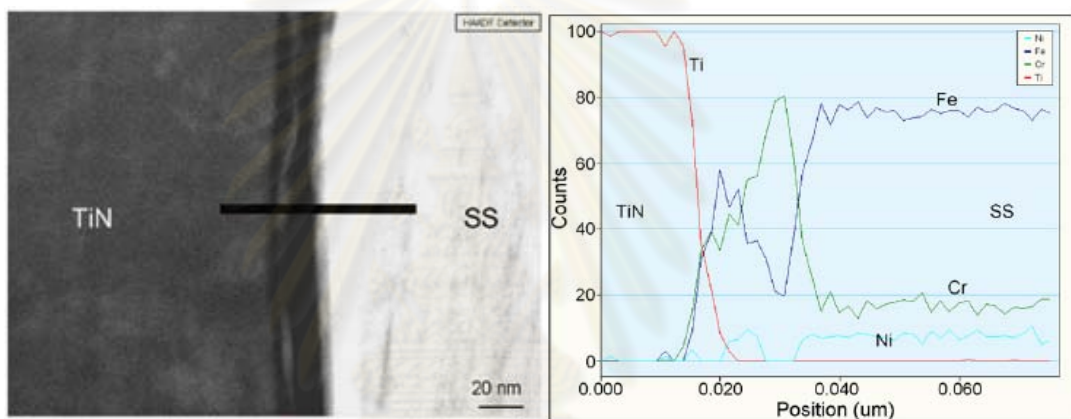


รูปที่ 2.10 จาก SEM แสดงการเกาะติดของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมบนชั้นงานดิสก์ชุบแข็ง [8]

สำหรับชั้นวานเนเดียม-ไนโอเบียมคาร์ไบด์เมื่อความเร็วการไหลเพิ่มขึ้นความร้อนสะสมที่ผิวการไหลเพิ่มขึ้นจนวงแหวนเหล็กกล้าไร้สนิมเกิดการร้อนแดงและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานค่อย ๆ ลดลง และคงที่ 0.35-0.40 ตั้งแต่นาทีที่ 6 ของเวลาการไหล

2.3.2 การเกิดออกไซด์ที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมช่วยลดการเกาะติดบนชั้นเคลือบ

M. Hanson, N. Stavlid, E. Coronel and S. Hogmark [9] ศึกษาพฤติกรรมการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมบนชั้นเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ พบว่าการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมอาจเป็นการสะสมชั้นออกไซด์ของเหล็กออกไซด์-โครเมียมออกไซด์บนผิวชั้นเคลือบแล้วเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมมาเกาะเหนือชั้นออกไซด์แสดงในรูปที่ 2.11



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.11 (ก) รอยต่อระหว่างชั้นไทเทเนียมไนไตรด์กับเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมที่หลุดมาเกาะติด (ข) EDS-line scan ตามเส้นสีดำใน (ก), [9]

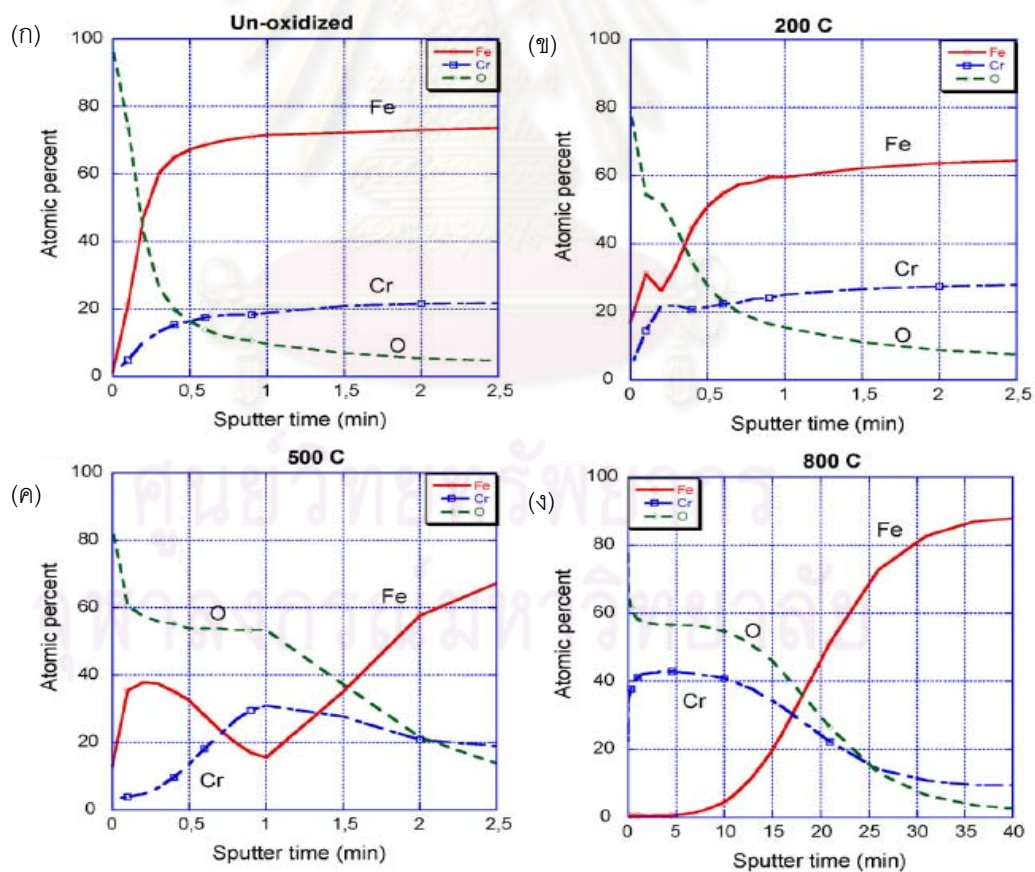
ภายหลังการทดสอบได้ตรวจวิเคราะห์บริเวณผิวสัมผัสการไหลของชั้นเคลือบที่มีเหล็กกล้าไร้สนิมเกาะติดด้วยเครื่อง EDS พบว่ามีออกไซด์ของเหล็กหนาประมาณ 10 นาโนเมตร จากผิวที่เหล็กกล้าไร้สนิมเกาะติดและซ้อนทับด้วยออกไซด์ของโครเมียมแล้วปกคลุมด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม เป็นไปได้ว่าการเกาะติดของออกไซด์ของเหล็กและออกไซด์ของโครเมียมที่ผิวไทเทเนียมไนไตรด์อาจเป็นพฤติกรรมที่นำไปสู่การเกาะติดของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมในเวลาต่อมา

วิเคราะห์เหล็กกล้าไร้สนิมที่ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C ด้วยเครื่อง ESCA พบว่ามีปริมาณธาตุโครเมียมมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่ให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าเป็นออกไซด์ของโครเมียมที่เกิดขึ้นที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอมของธาตุบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการให้ความร้อน ณ อุณหภูมิต่าง ๆ เปรียบเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน [9]

ชิ้นงาน	% O ₂	% Fe	% Cr
Un-oxidized	82.1	14.4	3.5
200 °C	79.8	18.2	1.9
500 °C	77.7	18.1	4.1
800 °C	82.2	1.8	16.0

ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุลึกลงจากผิวเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยเครื่อง ESCA แสดงในรูปที่ 2.12 พบว่าผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง 800 °C มีปริมาณโครเมียมสูง 16% โดยอะตอมขณะที่ธาตุเหล็กมีอยู่เพียง 1.6% โดยอะตอมที่อุณหภูมิ 200 °C และ 500 °C ที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมีปริมาณธาตุโครเมียมน้อยกว่าเหล็ก



รูปที่ 2.12 ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง ESCA ลึกลงจากผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการให้ความร้อน (ก) Un-oxidized (ข) 200 °C (ค) 500 °C (ง) 800 °C [9]

สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C ก่อนการทดสอบ อาจเป็นไปได้ว่าอ็อกไซด์ของโครเมียมมีความแน่นเพียงพอที่จะต้านทานการเกาะติดไม่ให้เกิดขึ้น ได้ชั่วขณะหนึ่ง

การเข้าใจถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเกาะติดตามที่ได้กล่าวมาช่วยลดความรุนแรงของการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมบนผิวเหล็กกล้าเครื่องมือลงได้เพื่อให้สามารถใช้งานเหล็กกล้าเครื่องมือได้อย่างมีประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งานให้นานขึ้น



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง

3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 เครื่องทดสอบการสึกหรอ (Friction Wear Tester EFM III-1010)
- 3.1.2 วงแหวนเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นคู่สัมผัสการไถล
- 3.1.3 เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC53 เป็นดิสก์
- 3.1.4 สารเคมีกรรมวิธี TRD ได้แก่ เกลือบอแรกซ์ ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) วาเนเดียมเพนทอกไซด์ (V_2O_5) และโบรอนคาร์ไบด์ (B_4C)
- 3.1.5 เตา muffles ใช้สำหรับหลอมเกลือบอแรกซ์และให้ความร้อนกับเบ้าเหล็กกล้าไร้สนิมเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิภายในเตา Muffle

3.2 ขั้นตอนการเตรียมดิสก์และเคลือบด้วยกระบวนการทีอาร์ดี

- 3.2.1 ตัดชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC53 มีส่วนผสมทางเคมีแสดงในตารางที่ 3.2 ขึ้นรูปและเจาะรูตามรูปที่ 3.2 หนา 5 มิลลิเมตร
- 3.2.2 ขัดขอบดิสก์ด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80 และขัดผิวหน้าดิสก์ด้วยกระดาษทรายจนถึงเบอร์ P1000 เพื่อขจัดสนิมสิ่งสกปรกที่ผิวชิ้นงานและเตรียมผิวชิ้นงานก่อนการเคลือบ
- 3.2.3 เคลือบดิสก์ DC53 โดยกรรมวิธี TRD ที่อุณหภูมิ $1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ใช้เวลา 6 ชั่วโมง 15 นาที

3.3 ขั้นตอนการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอแบบเกาะติด

- 3.3.1 เตรียมชิ้นงานดิสก์ขึ้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ (VC)
- 3.3.2 เตรียมชิ้นงานแหวนเหล็กกล้าไร้สนิม ขึ้นรูปขึ้นงานตามรูปที่ 3.3 เส้นผ่านศูนย์กลางด้านในเท่ากับ 20.00 ± 0.021 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางนอกเท่ากับ 25.6 ± 0.02 มม. ชิ้นงานทรงกระบอกสูง 15 มม. เจาะรูเสียบลวดวัดอุณหภูมิ
- 3.3.3 ทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงานทดสอบด้วย Supersonic cleaning
- 3.3.4 ชั่งน้ำหนักชิ้นงานดิสก์และแหวนก่อนการทดสอบ ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
- 3.3.5 ตั้งค่าพารามิเตอร์เครื่องทดสอบการสึกหรอ (Friction Wear Tester EFM III-1010) โดยมีขอบเขตการใช้งานเครื่อง ดังตารางที่ 3.1 คือค่าแรงกด, ความเร็วการไถลและระยะทางไถล เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอแบบเกาะติด

- 3.3.8 ทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่อง Supersonic cleaning
- 3.3.9 ชั่งน้ำหนักชิ้นงานดิสก์และแหวนหลังการทดสอบด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง

3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผิววงแหวนและผิวดิสก์บริเวณที่เกิดการเกาะติดหลังการทดสอบ

- 3.4.1 ถ่ายรูปเหล็กกล้าไร้สนิมที่เกาะติดบนผิวชิ้นงานดิสก์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด
- 3.4.2 วัดปริมาณธาตุของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผิวโดยใช้เครื่อง Energy dispersive electron spectroscopy (SEM-EDS)
- 3.4.3 วิเคราะห์สารประกอบที่ผิววงแหวนด้วยเครื่อง X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)
- 3.4.4 วิเคราะห์ธาตุที่ผิวดิสก์และวงแหวนด้วยเครื่อง Electron Probe Micro Analysis (EPMA)

3.5 เงื่อนไขในการทดลอง

แบ่งเป็น 3 ส่วน ในตารางที่ 3.1

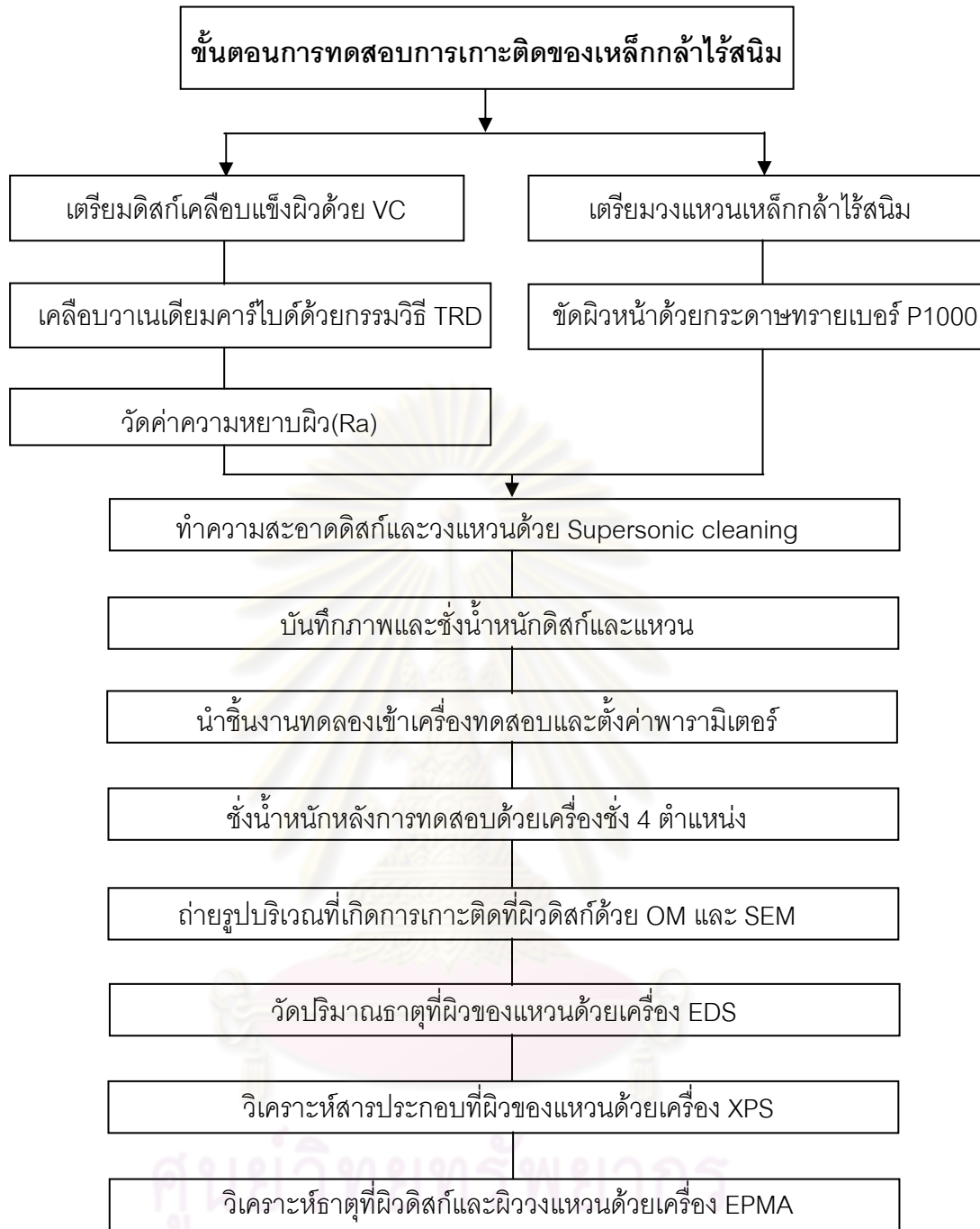
- 3.5.1 แปรผันระยะทางไกลจาก 1,000 เมตร ถึง 2,200 เมตรด้วยแรงกด 220 นิวตัน ความเร็วการไกล 1.432 เมตร/วินาที
- 3.5.2 ให้แรงกดคงที่ 220 นิวตัน แปรผันความเร็วไกลในช่วง 0.716 - 2.148 เมตร/วินาที
- 3.5.3 ให้ความเร็วคงที่ 1.432 เมตร/วินาที แปรผันแรงกดในช่วง 120 - 320 นิวตัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการทดลองเพื่อหาการสูญเสียเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมที่ความเร็วและแรงกดค่าต่างๆ

ชั้นเคลือบผิวแข็ง	ความเร็วการไถล (เมตร/วินาที)	แรงกด (นิวตัน)	ระยะทางไถล (เมตร)
(VC)	0.716	220	2,000
	1.074	220	2,000
	1.432	220	2,000
	1.790	220	2,000
	2.148	220	2,000
	1.432	120	2,000
	1.432	170	2,000
	1.432	220	2,000
	1.432	320	2,000
	1.432	220	1,000
	1.432	220	1,500
	1.432	220	2,000
	1.432	220	2,200

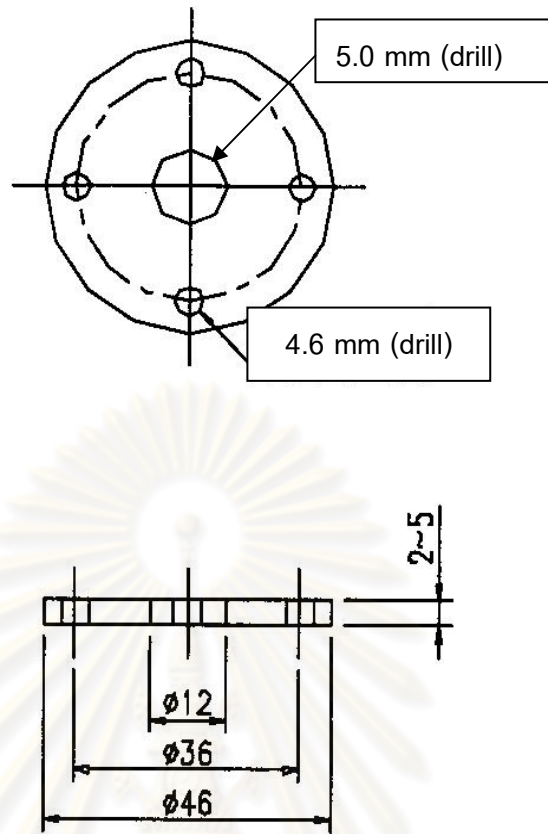
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



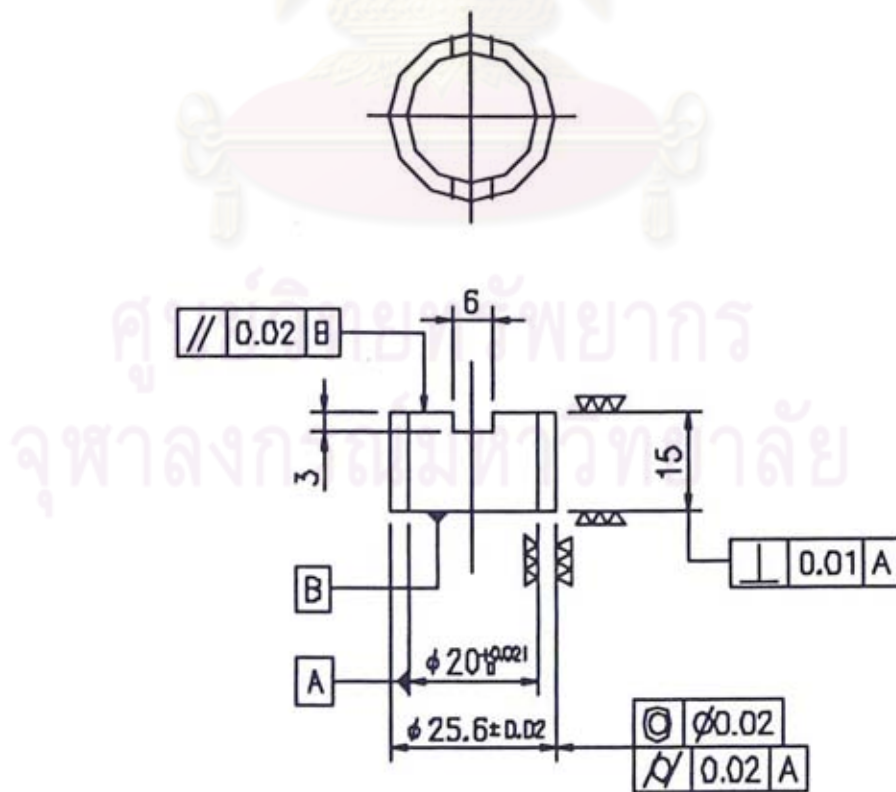
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดสอบการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมบนชั้นวานาเดียมคาร์ไบด์

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC53 (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

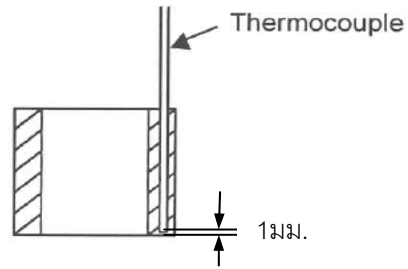
ส่วนผสม ดิสก์	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Fe
DC53 (Modified SKD 11)	0.93	1.03	0.41	0.016	< 0.001	6.82	1.99	0.09	0.07	0.25	bal.



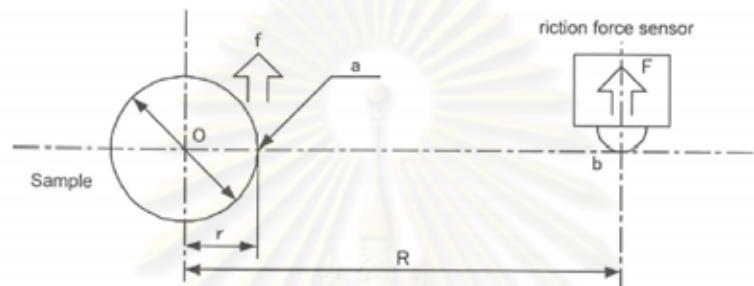
รูปที่ 3.2 แบบขึ้นงานดิสก์เหล็กDC53 มีความหนา 5 มม. [10]



รูปที่ 3.3 แบบขึ้นงานแหวนเหล็กกล้าไร้สนิม [10]



รูปที่ 3.4 แนวเจาะรูเพื่อเสียบเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิขณะทำการทดสอบ [10]



รูปที่ 3.5 แบบจำลองแสดงการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

สมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน [10]

จากรูปที่ 3.5

$$f = \frac{FR}{r}$$

$$\mu = \frac{f}{W} = \frac{FR}{Wr}$$

μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

f คือ แรงเสียดทาน

F คือ แรงที่อ่านได้จาก load cell

W คือ แรงกดตามแนวตั้ง

r คือ ระยะ oa

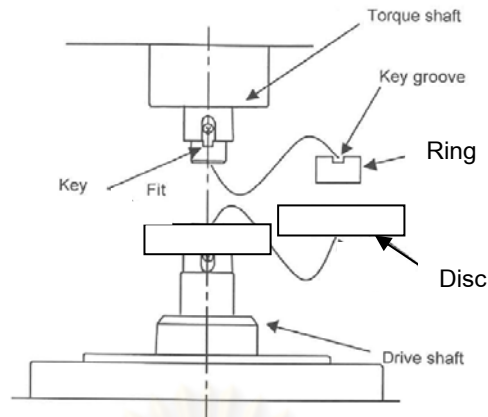
R คือ ระยะ ob

ตารางที่ 3.3 ขอบเขตเครื่องทดสอบ (Friction Wear Tester EFM III-1010) [10]

รายการ	ขอบเขตการใช้งานของเครื่อง
แรงกด (N)	30 ถึง 5000
ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	0.2 ถึง 10
ค่าแรงบิดสูงสุด (N.m)	10
ความเร็วรอบ (m.s ⁻¹)	0.1 to 11.93

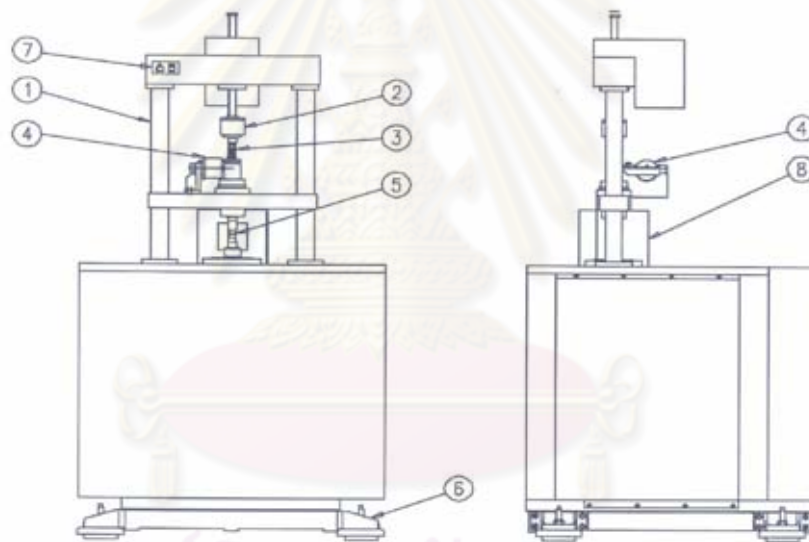
ตารางที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ของแรงส่งกำลังเครื่องทดสอบกับความเร็วการไถลและสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

แรงส่งกำลัง (τ) (N.m)	ความเร็วรอบสูงสุด (m/sec)	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (μ)	แรงเสียดทานสูงสุด (N)
10	2.98	1	877
		0.8	1096
		0.6	1461
		0.5	1754
		0.4	2192
5	5.97	1	439
		0.8	548
		0.6	731
		0.5	878
		0.4	1096
3	7.99	1	263
		0.8	328
		0.6	438
		0.5	526
		0.4	657
2	11.93	1	175
		0.8	218
		0.6	292
		0.5	350
		0.4	438



รูปภาพที่ 3.6 แสดงการวางชิ้นงานการทดสอบแบบ Ring-On-Disc [10]

เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบ Ring-On-Disc (Friction Wear Tester EFM III-1010)



รูปที่ 3.7 แบบเครื่องทดสอบ [10]

- (1) Support
- (2) Pressuring load cell
- (3) Pressurizing spring mechanism
- (4) Friction load cell
- (5) Test piece
- (6) Vibration-proof seat
- (7) Pressurizer UP/DOWN
- (8) Safety cover

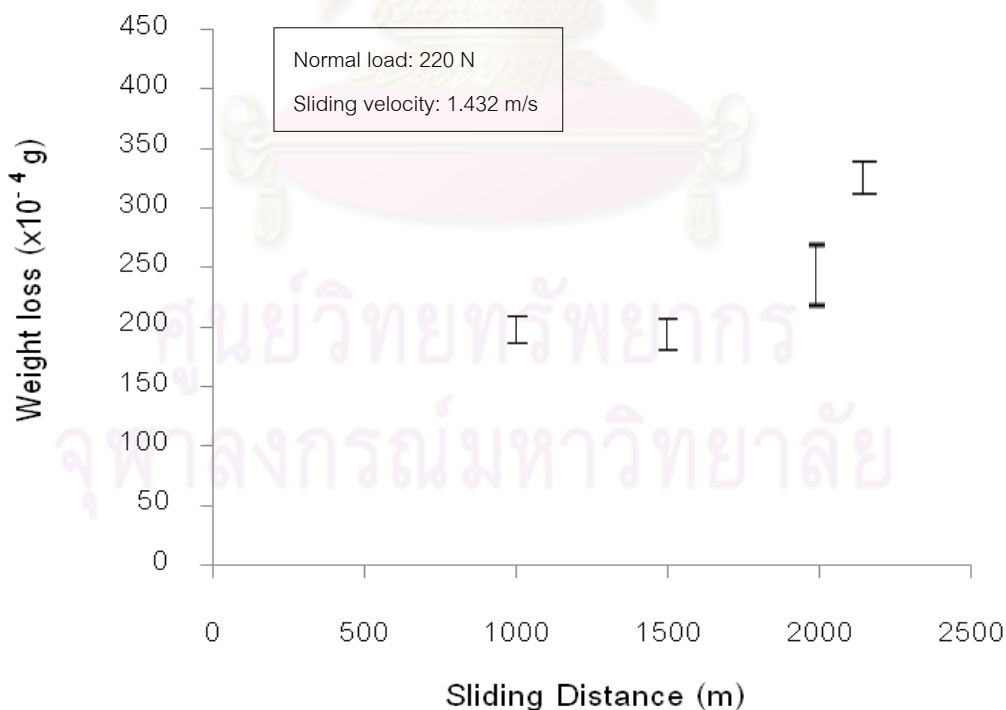
บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปราย

ทดสอบการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมบนชั้นฉนวนเทียมคาร์ไบด์ด้วยเครื่องทดสอบแบบ ring - on -disc ไถลแบบแห้งภายใต้ความดันบรรยากาศโดยดิสก์เป็นชั้นฉนวนเทียมคาร์ไบด์ที่เคลือบด้วยกระบวนการ TRD ชัดผิวดิสก์หลังเคลือบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 2000 ดิสก์มีค่าความหยาบผิว Ra ในช่วง 0.10 - 0.15 ไมครอนซึ่งความหยาบผิวในช่วงนี้ช่วยต้านทานการเกาะติดได้[7] วงแหวนเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 เตรียมผิวก่อนการทดสอบด้วยกระดาษทรายเบอร์ P1000

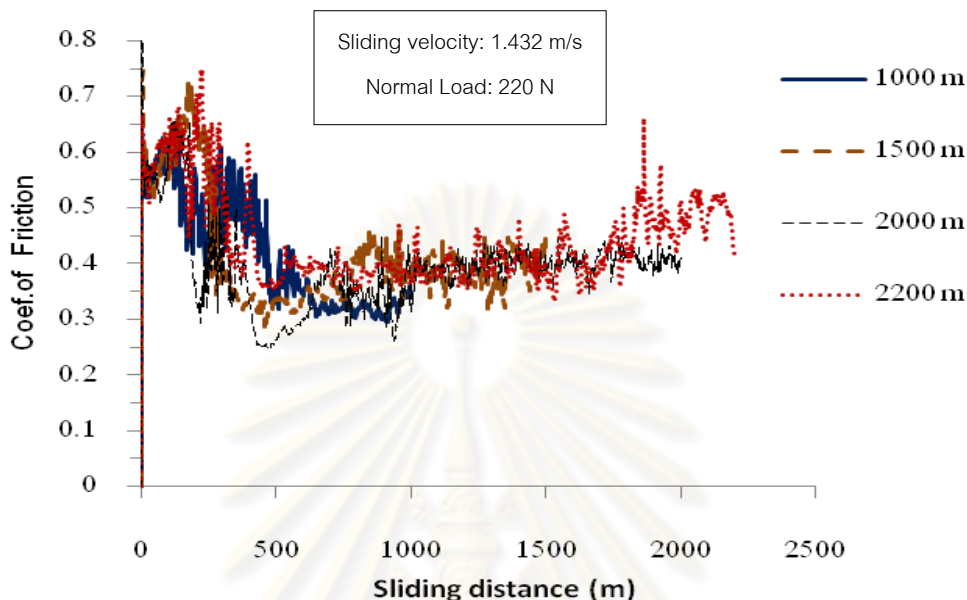
4.1 แปรผันระยะทางการไถลที่แรงกดและความเร็วการไถลคงที่

แปรผันระยะทางการไถลในช่วง 1,000 - 2,200 เมตรที่ระยะทางการไถล 1,000 เมตรและ 1,500 เมตร พบว่าเนื้อวงแหวนที่สูญเสียไปเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 21 มก.แล้วเพิ่มขึ้นเป็น 24 มก.ที่ระยะทางการไถลเพิ่มขึ้นอีกเป็น 2,000 เมตรและที่ระยะทางการไถล 2,200 เมตรเนื้อวงแหวนสูญเสียไปเพิ่มขึ้นเป็น 34 มก.แสดงในรูปที่ 4.1



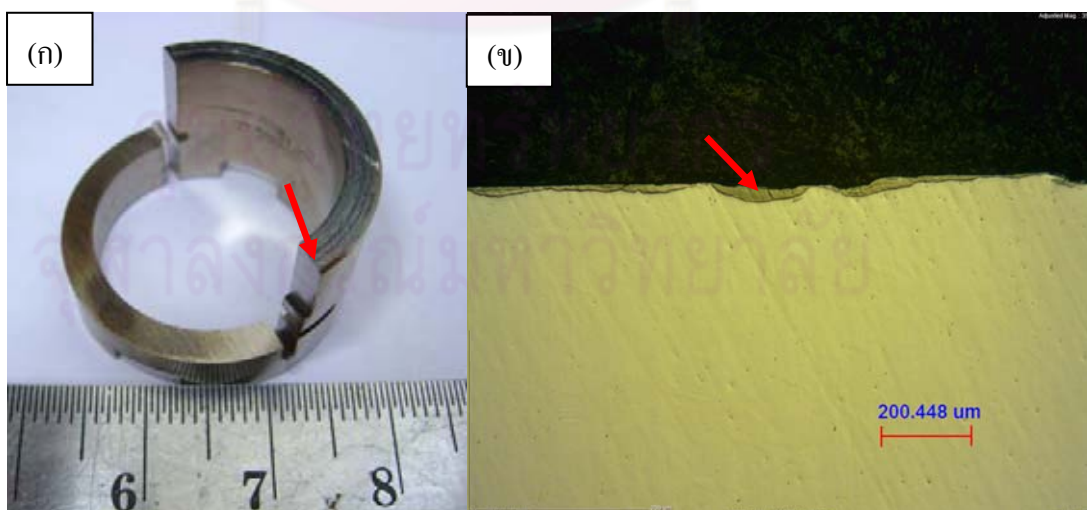
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมที่สูญเสียไปกับระยะทางการไถล

เนื้อวงแหวนสูญญไปเพิ่มขึ้นตามระยะทางการไถลที่เพิ่มสูงขึ้นและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างวงแหวนกับดิสก์เพิ่มสูงถึง 0.7 แล้วลดลงจนถึง 0.3 ในช่วงสั้นๆ แล้วเพิ่มขึ้นอีกเป็น 0.4 และคงที่จนสิ้นสุดการไถลแสดงในรูปที่ 4.2



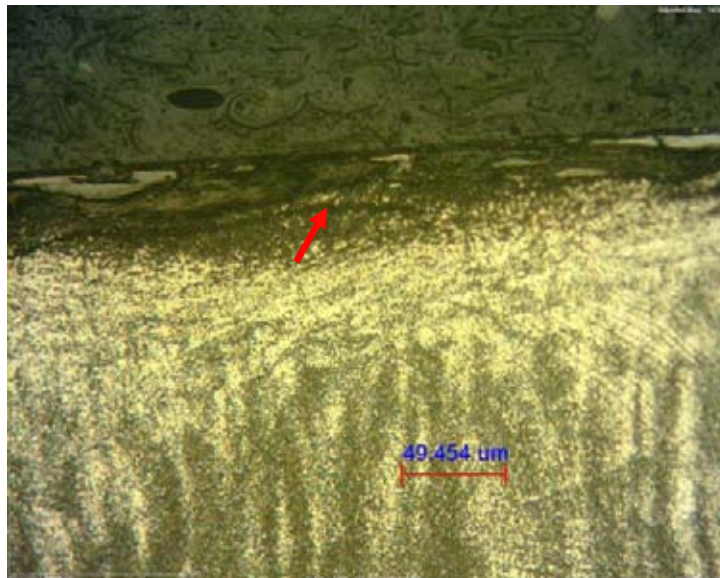
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับระยะทางการไถล

การที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลงอาจเป็นไปได้ว่าผิววงแหวนเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ตรวจสอบได้ผิววงแหวนที่ระยะทางการไถล 2,000 เมตร แรงกด 220 นิวตัน ความเร็ว 1.432 เมตรวินาที โดยตัดวงแหวนในแนวตั้งฉากกับระนาบการไถลในรูปที่ 4.3(ก) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงได้ผิวสัมผัสการไถลแสดงในรูปที่ 4.2(ข)



รูปที่ 4.3 (ก) แนวตัดตั้งฉากกับผิววงแหวน (ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงที่ผิววงแหวนตรงหัวลูกศร

พบรอยแตกเป็นแนวยาวในบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ผิววงแหวนอีกด้วย อาจเป็นไปได้ว่ารอยแตกที่ใต้ผิวการไหลของวงแหวนมีส่วนเกี่ยวข้องกับเนื้อวงแหวนที่สูญเสียไป ตามระยะทางการไหลที่เพิ่มมากขึ้นแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 รอยแตกใต้ผิววงแหวนตรงหัวลูกศร

อาจกล่าวได้ว่าที่ระยะทางการไหลตั้งแต่ 2,000 เมตรเป็นระยะที่เริ่มสูญเสียเนื้อวงแหวนไปมากและเป็นไปได้ยิ่งกว่าการสูญเสียเนื้อวงแหวนมากในช่วงนี้เกิดจากชั้นออกไซด์ที่มีความหนาไม่เพียงพอที่จะต้านทานการเกาะติดได้ แสดงในรูปที่ 4.5

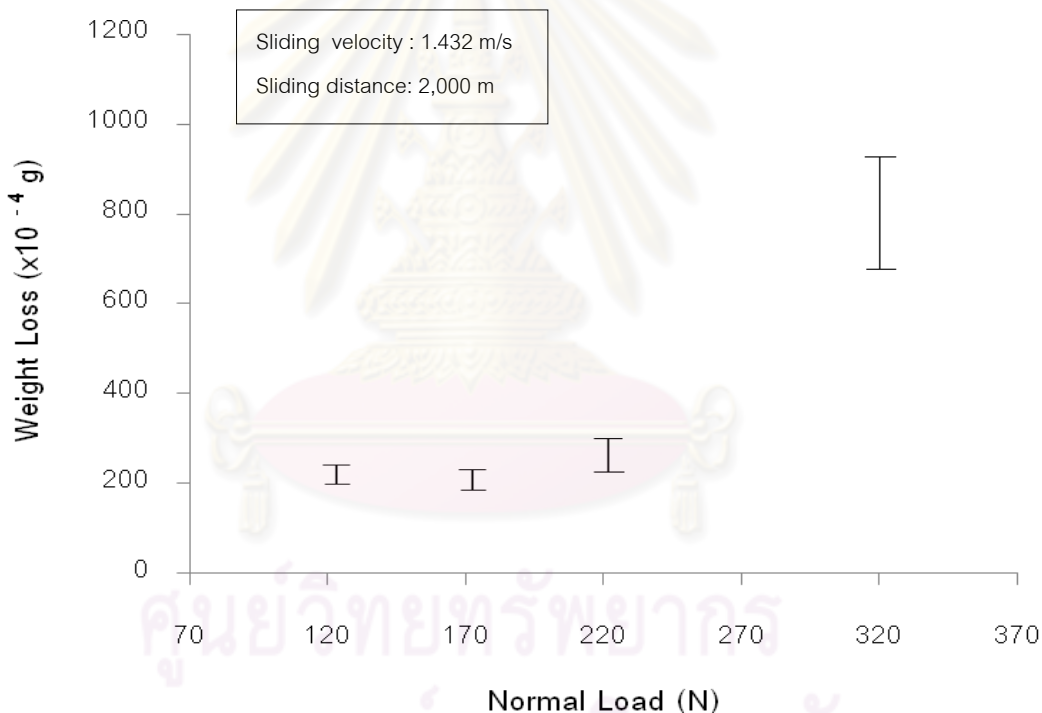


รูปที่ 4.5 ตรงหัวลูกศรแสดงชั้นออกไซด์ปกคลุมตลอดผิวสัมผัสการไหลของวงแหวน และวงรีแสดงบริเวณที่เนื้อวงแหวนสูญเสียไป

นอกจากนี้เมื่อระยะทางไกลที่เพิ่มขึ้นการสูญเสียเนื้อวงแหวนยังอาจเพิ่มขึ้นได้จากการขัดสีของเศษผง (debris) ซึ่งมีความแข็งสูงเนื่องจากการแปรรูปแบบพลาสติกหรือการเปลี่ยนแปลงจากเฟสออสเตไนท์ (γ) เป็นมาร์เทนไซต์ (α') บางส่วน

4.2 แปรผันแรงกดที่ความเร็วคงที่

แปรผันค่าแรงกดในช่วง 120 – 320 นิวตันที่ความเร็วการไถล 1.432 เมตร/วินาที ระยะทางการไถล 2,000 เมตร ที่แรงกด 120 นิวตันเนื้อวงแหวนที่สูญเสียไปประมาณ 22 มก. ซึ่งใกล้เคียงกับน้ำหนักที่สูญเสียไปที่แรงกด 170 นิวตันแล้วเนื้อวงแหวนที่สูญเสียไปเพิ่มขึ้นอีกเป็น 24 มก. ที่แรงกด 220 นิวตันและที่แรงกดเพิ่มขึ้นเป็น 320 นิวตันเนื้อวงแหวนสูญเสียไป 85 มก. โดยเฉลี่ยแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมที่สูญเสียไปที่แรงกดต่างๆ

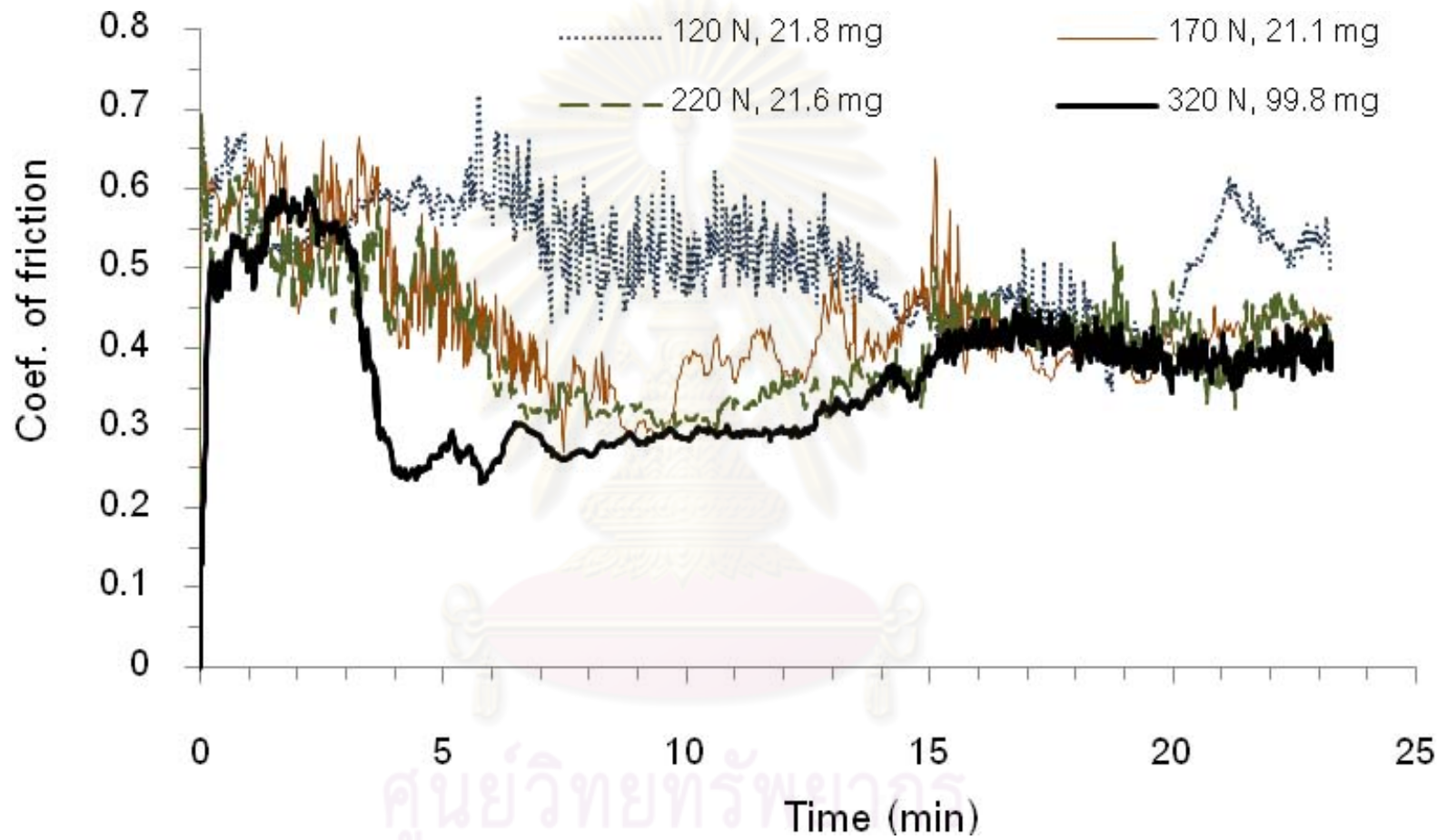
เนื้อวงแหวนสูญเสียไปเพิ่มขึ้นตามแรงกดที่เพิ่มสูงขึ้นและเพิ่มขึ้นมากที่แรงกดสูง 320 นิวตันอาจเป็นไปได้ว่าชั้นออกไซด์ที่ผิววงแหวนถูกทำลายไปบางส่วนเนื่องจากภาระแรงกระทำที่สูงและระยะทางการไถลเพิ่มมากขึ้น

พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่แรงกดเพิ่มขึ้น ที่แรงกด 120 นิวตันเส้นกราฟสีฟ้าแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าสูง 0.60 ตั้งแต่เริ่มไถลจนถึงนาทีที่ 14 ของเวลาการไถลซึ่งลดลงเป็น 0.4 ช่วงสั้นๆแล้วเพิ่มขึ้นอีกเป็น 0.65 ในนาทีที่ 20 แล้วลดลงเล็กน้อย

ก่อนสิ้นสุดการไหล ที่แรงกด 170 นิวตันกราฟเส้นสีน้ำตาลค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมีค่า 0.60 ตั้งแต่เริ่มการไหลแล้วลดลงอย่างช้าๆจน ถึง 0.4 ในนาที่ที่ 8 แล้วคงที่จนนาที่ที่ 15 – 16 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายเพิ่มขึ้นถึง 0.7 ช่วงสั้นๆ แล้วลดลงเป็น 0.4 คงที่จนสิ้นสุดการไหล ที่แรงกด 220 นิวตันเส้นกราฟสีเขียวในช่วง 3 นาทีแรกแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายลดลงจาก 0.6 เป็น 0.3 ช่วงสั้นๆ แล้วเพิ่มขึ้นอีกเป็น 0.4 ช่วงสั้นๆ แล้วลดลงต่ำถึง 0.25 ช่วงสั้นๆแล้วเพิ่มขึ้นอีกเป็น 0.4 และคงที่จนสิ้นสุดการไหล ที่แรงกด 320 นิวตันเส้นกราฟสีดำแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมีค่าลดลง จาก 0.6 เป็น 0.25 ในนาที่ที่ 4 และยังคงต่ำ 0.25- 0.30 จนถึงนาที่ที่ 13 แล้วค่อยๆเพิ่มขึ้นเป็น 0.4 และคงที่จนสิ้นสุดการไหลแสดงในรูปที่ 4.7

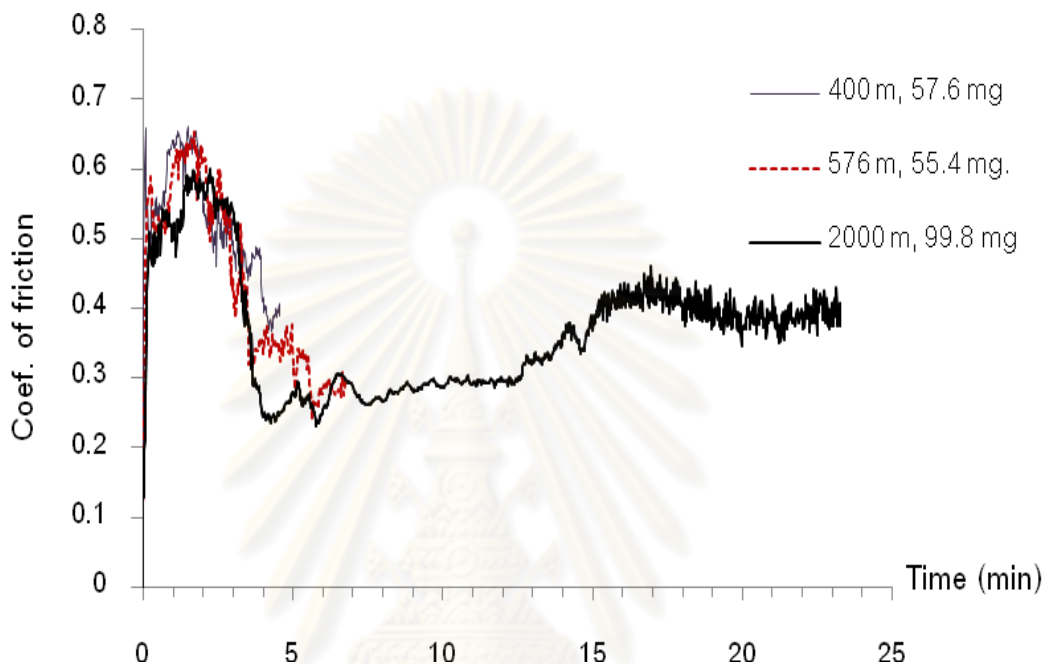


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับเวลาการไถลที่แรงกดต่างๆและแสดงน้ำหนักที่สูญไปของเหล็กกล้าไร้สนิม

เปรียบเทียบเนื้องวงแหวนที่สูญเสียไปในช่วงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลงต่ำที่ระยะทางไกล 400 เมตรและ 576 เมตรพบว่าน้ำหนักที่สูญเสียไปมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 56 มก. ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ลดลงถึง 0.25 อาจเป็นไปได้ว่าเนื้องวงแหวนไม่เกิดการเกาะติดบนชั้นเคลือบ น้ำหนักวงแหวนที่สูญเสียไปตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการไกลที่ระยะทาง 2,000 เมตรมีค่าเพิ่มขึ้นอีกเป็น 100 มก.แสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับเวลาการไกลที่แรงกด 320 N และแสดงน้ำหนักที่สูญเสียไปของเหล็กกล้าไร้สนิม

ในช่วง 3 นาทีแรกค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าสูงกว่า 0.5 การไกลของวงแหวนกับดิสก์มีเสียงดังเป็นระยะๆ แล้วเงียบลงเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลงจนถึง 0.25 และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานยังคงต่ำในช่วงเวลา 4 – 15 นาทีนับจากเริ่มไกล แล้วเสียงจากการไกลดังขึ้นอีกตามค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เพิ่มขึ้นอีกเป็น 0.4 จนถึงสิ้นสุดการไกล

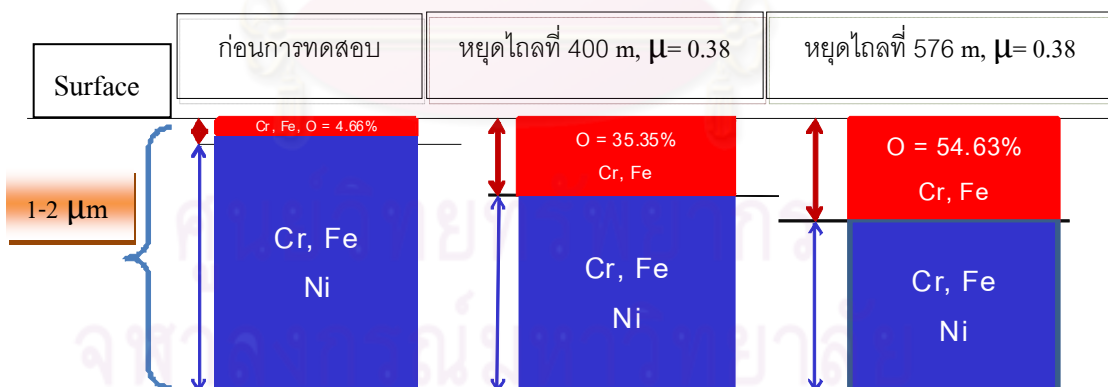
เมื่อนำวงแหวนที่รับแรงกด 320 นิวตันและความเร็วไกล 1.432 เมตร/วินาทีไปวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่ผิวการไกลด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope - EDS (SEM-EDS) พบว่า%โดยอะตอมของธาตุออกซิเจนของผิววงแหวนก่อนการทดสอบมีธาตุออกซิเจน 4.66%โดยอะตอมและตั้งแต่ระยะทางการไกล 400 เมตรมีธาตุออกซิเจนเพิ่มขึ้นเป็น 35.35% แล้วเพิ่มขึ้นอีกที่ระยะทางการไกลตั้งแต่ 576 เมตรเป็น 54.63 แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM-EDS

วงแหวน (320 N, 1.432 m/s)	%โดยอะตอมของธาตุ			
	O	Cr	Fe	Ni
ก่อนการทดสอบ (Un-Oxidized)	4.66	18.38	68.08	8.88
หยุดที่ระยะทางการไถล 400 m ($\mu=0.38$)	35.35	11.08	47.19	5.05
หยุดที่ระยะทางการไถล 576 m ($\mu=0.28$)	54.63	9.44	29.17	3.23

เมื่อเปรียบเทียบวงแหวนก่อนและหลังการไถลพบว่าปริมาณออกซิเจนที่ก่อนการทดสอบมีประมาณน้อยกว่าออกซิเจนที่หลังการทดสอบ 5 ถึง 7 เท่า อาจเป็นไปได้ว่าผิววงแหวนหลังการทดสอบมีออกไซด์ปกคลุมอยู่และออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้อาจมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นหรือหนาเพิ่มขึ้นตามค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่ลดลงถึง 0.25 ในเวลา 3 นาทีแรกของการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.9

วิเคราะห์ปริมาณธาตุนบนผิววงแหวนด้วย SEM-EDS



รูปที่ 4.9 แบบจำลองแสดงปริมาณออกไซด์จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM-EDS

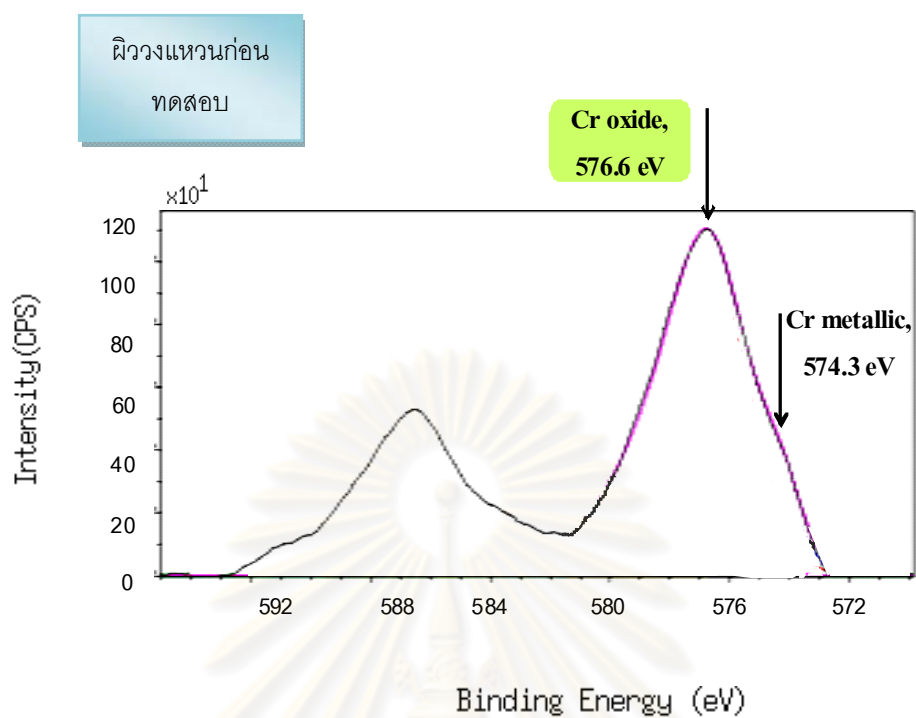
นำวงแหวนตามตารางที่ 4.1 มาวิเคราะห์ออกไซด์ด้วยเครื่อง X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) ผลการวิเคราะห์สารประกอบที่ผิววงแหวนด้วยเครื่อง XPS พบว่าวงแหวนก่อนการทดสอบมีออกไซด์ของโครเมียมหนาแน่น 14.52% แต่ไม่พบออกไซด์ของเหล็กและวงแหวนที่ระยะทางการไถลตั้งแต่ 400 เมตรออกไซด์ของเหล็กมี 25.51% และลดลงเป็น 12.95% ที่ระยะทางการไถลตั้งแต่ 576 เมตร ส่วนออกไซด์ของโครเมียมที่ระยะทางการไถลตั้งแต่ 400 เมตรมีปริมาณลดลงเป็น 0.78% และเพิ่มขึ้นเป็น 1.84% ที่ระยะทางการไถลตั้งแต่ 576 เมตร ผลวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์สารประกอบออกไซด์ที่ผิววงแหวนด้วยเครื่อง XPS

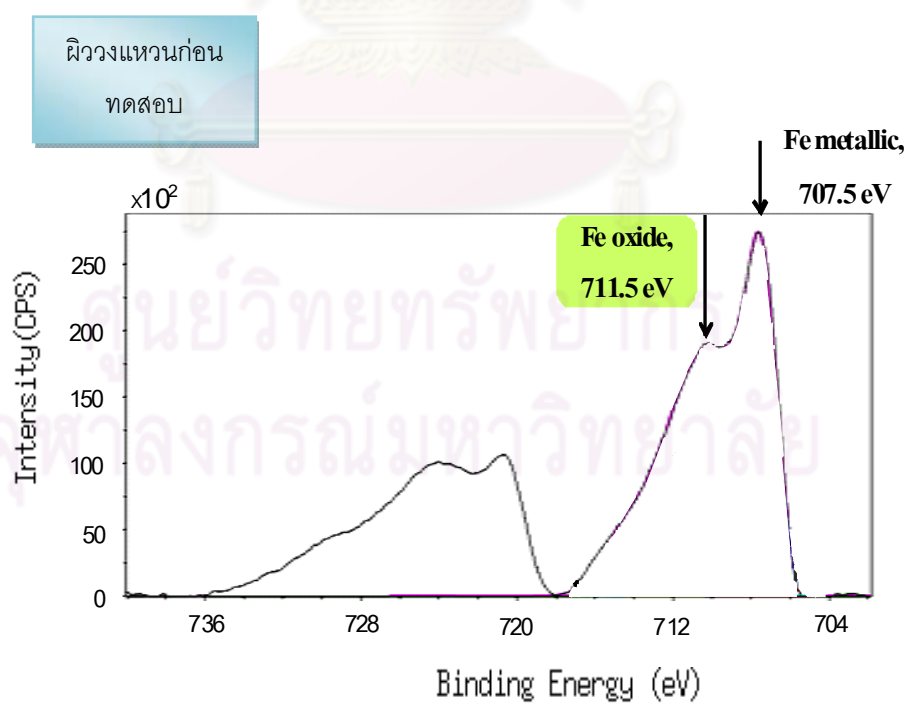
วงแหวน (320 N, 1.432 m/s)	Atomic concentration %		
	O	Cr	Fe
ก่อนการทดสอบ (Un-Oxidized)	43.92	14.52	0
หยุดที่ระยะทางการไถล 400 m ($\mu=0.38$)	45.12	0.78	25.51
หยุดที่ระยะทางการไถล 576 m ($\mu=0.28$)	37.14	1.84	12.95

จากตารางที่ 4.2 ออกไซด์ของเหล็กลดลงจาก 25.51% เป็น 12.95% ซึ่งสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่ลดลงจาก 0.38 จนถึง 0.28 อาจเป็นไปได้ว่าออกไซด์ของเหล็กมีส่วนเกี่ยวข้องกับการเกาะติดบนชั้นเคลือบในช่วงแรกของการไถล

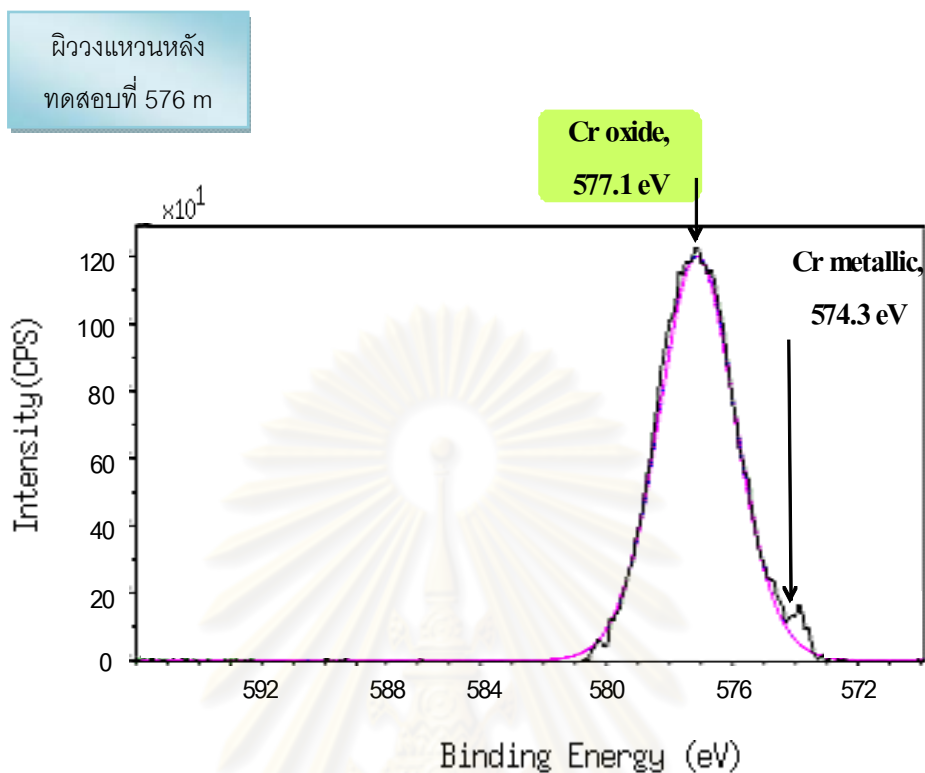
ผลวิเคราะห์ออกไซด์บนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนและหลังการทดสอบที่ระยะทางการไถล 576 เมตรและ 2,000 เมตร โดยอ้างอิงค่า Binding Energy (eV) ในรูปที่ 4.10 - 4.15



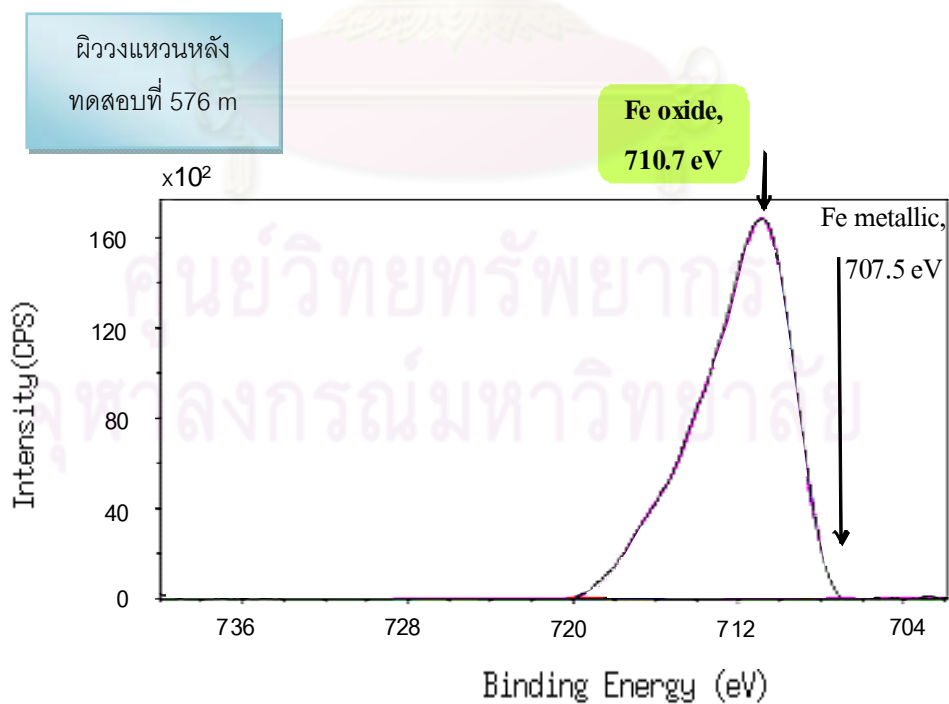
รูปที่ 4.10 วิเคราะห์อิเล็กตรอนของโครเมียมบนผิววงแหวนก่อนการทดสอบด้วยเครื่อง XPS



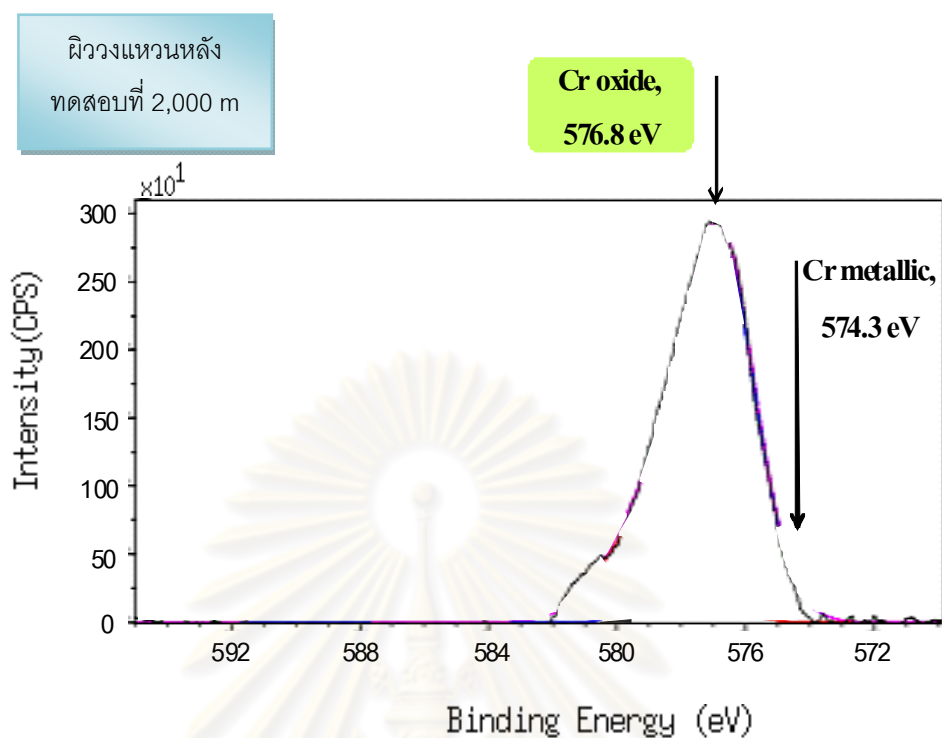
รูปที่ 4.11 วิเคราะห์อิเล็กตรอนของเหล็กบนผิววงแหวนก่อนการทดสอบด้วยเครื่อง XPS



รูปที่ 4.12 วิเคราะห์ออกไซด์ของโครเมียมบนผิววงแหวนที่ระยะไกลการไกล 576 m ด้วยเครื่อง XPS

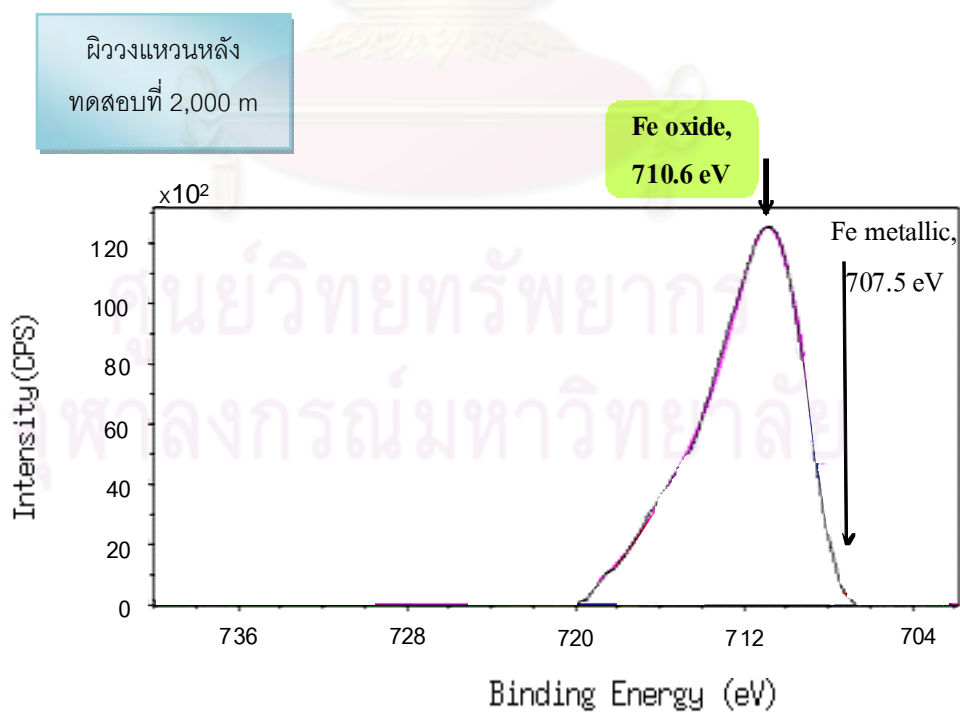


รูปที่ 4.13 วิเคราะห์ออกไซด์ของเหล็กบนผิววงแหวนที่ระยะไกลการไกล 576 m ด้วยเครื่อง XPS



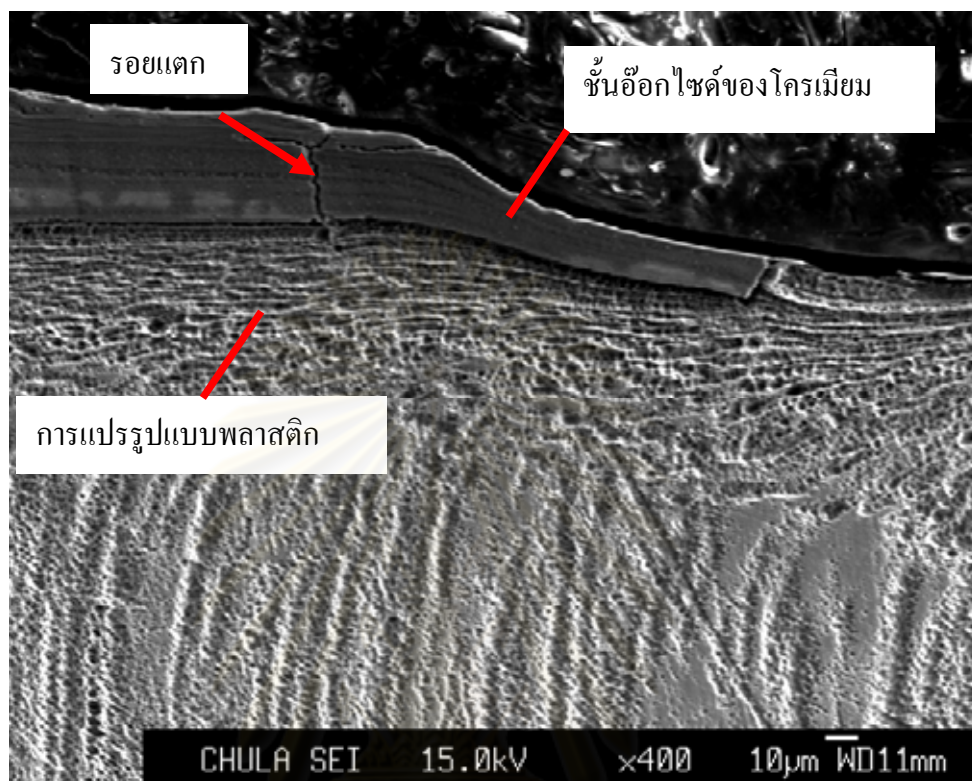
รูปที่ 4.14 วิเคราะห์ออกไซด์ของโครเมียมบนผิววงแหวนที่ระยะไกลการไกล 2,000 m

ด้วยเครื่อง XPS



รูปที่ 4.15 วิเคราะห์ออกไซด์ของเหล็กบนผิววงแหวนที่ระยะไกลการไกล 2,000 m ด้วยเครื่อง XPS

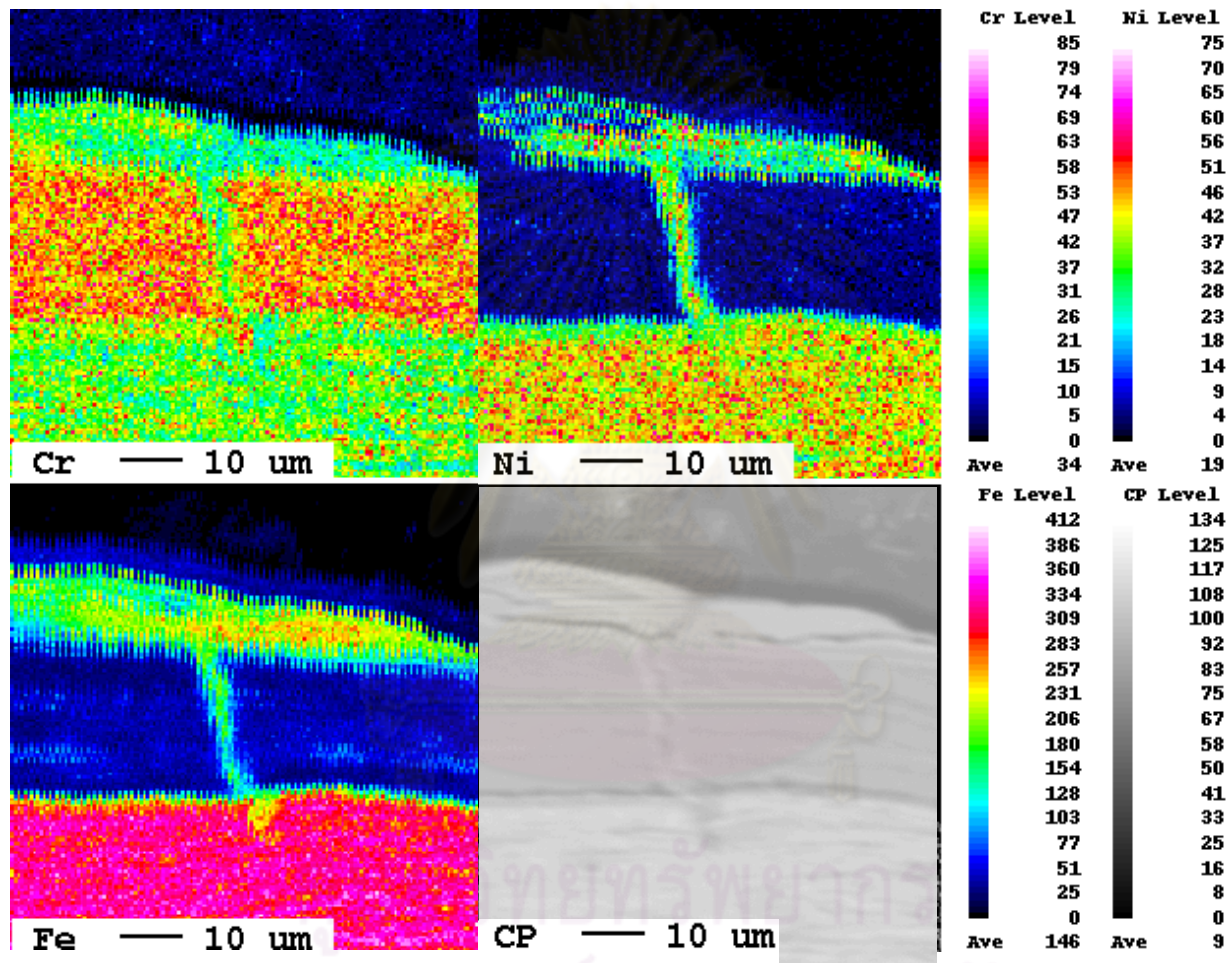
ตรวจสอบผิววงแหวน ที่แรงกด 320 นิวตันที่ระยะทาง 576 เมตรด้วยการตัดตามแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหล พบว่าผิววงแหวนมีการเปลี่ยนแปลงไปแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงที่ผิวสัมผัสการไหลของวงแหวนที่ระยะทางการไหล 576 เมตร และการแปรรูปแบบพลาสติก

วิเคราะห์ผิววงแหวนบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยเครื่อง EPMA แสดงในรูปที่ 4.17

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.17 ผลวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EPMA ที่ผิววงแหวนบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลง

ผลวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EPMA พบว่าบริเวณผิวที่เกิดการเปลี่ยนแปลงมีธาตุโครเมียมซึ่งเห็นเป็นจุดสีแดงและสีเหลืองกระจายอยู่หนาแน่นและในพื้นที่เดียวกันไม่พบธาตุเหล็ก และนิกเกิลจึงอาจเป็นไปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นที่ผิววงแหวนเป็นชั้นออกไซด์ของโครเมียม ซึ่งมีความหนาประมาณ 10-25 ไมครอนและที่ได้ชั้นออกไซด์ของโครเมียมพบธาตุเหล็ก โครเมียม และนิกเกิลอยู่บนพื้นที่เดียวกันซึ่งสรุปได้ว่าเป็นเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมและเป็นบริเวณที่เกิดการแปรรูปแบบพลาสติกประมาณ 30 ไมครอนลึกจากชั้นออกไซด์ของโครเมียม

ที่แรงกดสูง 320 นิวตันชั้นออกไซด์ของโครเมียมที่ผิววงแหวนมีความหนามากกว่าที่แรงกดต่ำกว่าอาจเป็นไปได้ว่าแรงกดที่สูงช่วยเร่งอัตราการแพร่ของธาตุโครเมียมในเนื้อเหล็กจนออกไซด์ของโครเมียมมีอิทธิพลเหนือกว่าออกไซด์ของเหล็กทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายลดลงถึง 0.25 ตั้งแต่หน้าที่ที่ 4 และยังคงต่ำจนถึงหน้าที่ที่ 13 นับจากเริ่มการไถล

น้ำหนักที่สูญเสียไปของวงแหวนเพิ่มขึ้นอีกเมื่อระยะเวลาทางการไถลเพิ่มขึ้นอีกเป็น 2,000 เมตร อาจเป็นไปได้ว่าน้ำหนักที่สูญเสียไปส่วนใหญ่เกิดจากการเกาะติดในบริเวณผิวของวงแหวนไม่มีชั้นออกไซด์ของโครเมียมปกคลุม

จากการทดสอบให้แรงกด 320 N และหยุดไถลที่ระยะเวลาทางการไถล 400, 576 และ 2,000 เมตร สัมประสิทธิ์ความเสียหายมีค่า 0.38, 0.25 และ 0.40 ตามลำดับ ที่ระยะไถล 400 และ 576 เมตรพบว่าเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเกาะติดบนชั้นวานาเดียมคาร์ไบด์แสดงในรูปที่ 4.18



(ก) 400 m

(ข) 576 m

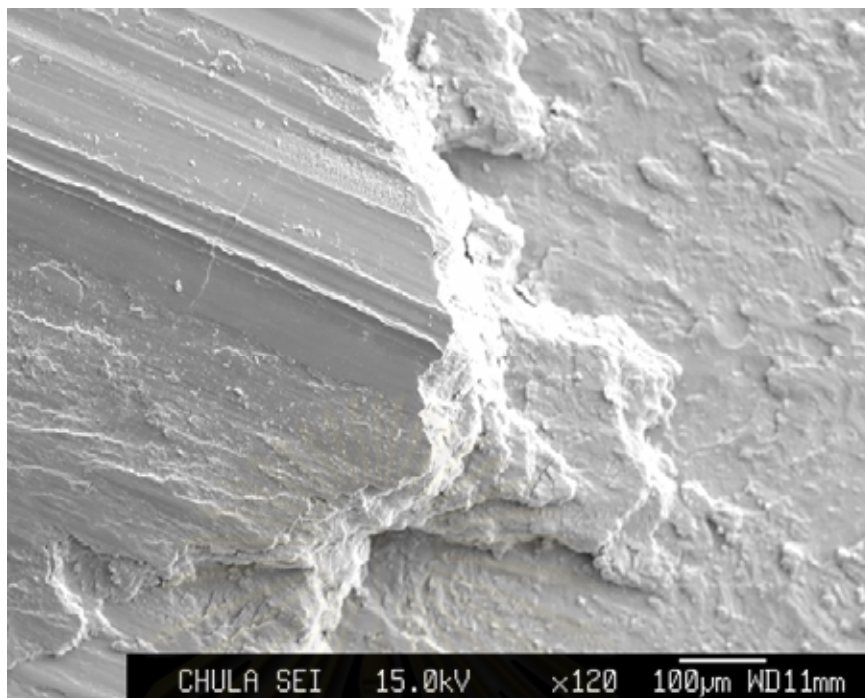


(ค) 2,000 m

รูปที่ 4.18 เนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเกาะติดบนชั้นวานเนเดียมคาร์ไบด์ที่หยุดที่ระยะทางต่างๆ

ที่ระยะทางการไถล 400 เมตร และ 576 เมตรมีเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเกาะติดที่ชั้นวานเนเดียมคาร์ไบด์ 25 มก. และ 10 มก. แสดงในรูปที่ 4.19 และที่ระยะ 2,000 เมตรพบว่าน้ำหนักของดิสก์ไม่เพิ่มขึ้น อาจเป็นไปได้ว่าเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคยเกาะติดบนชั้นเคลือบได้หลุดออกในระหว่างการไถล

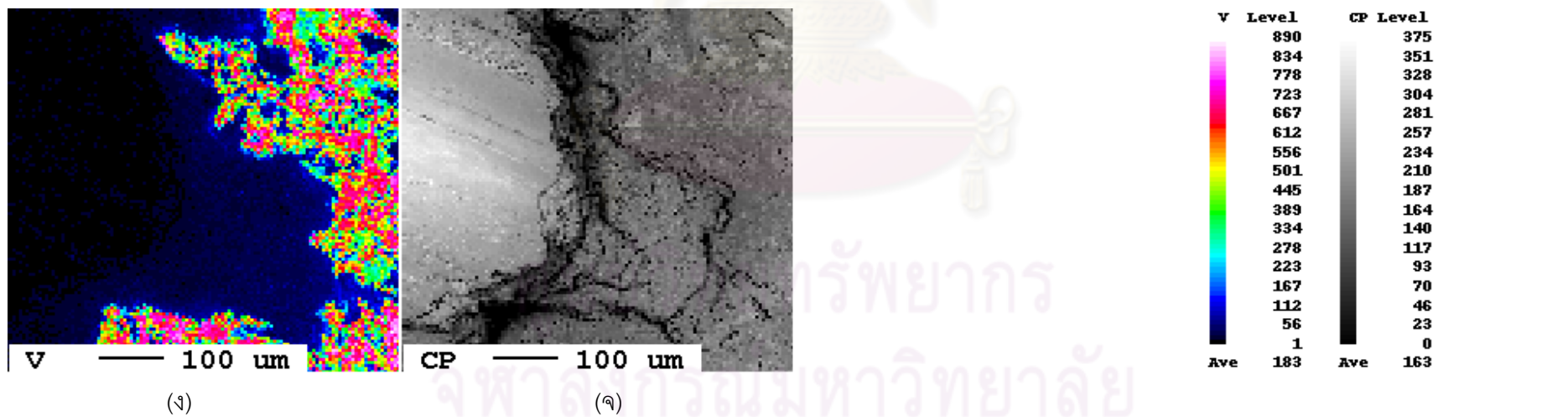
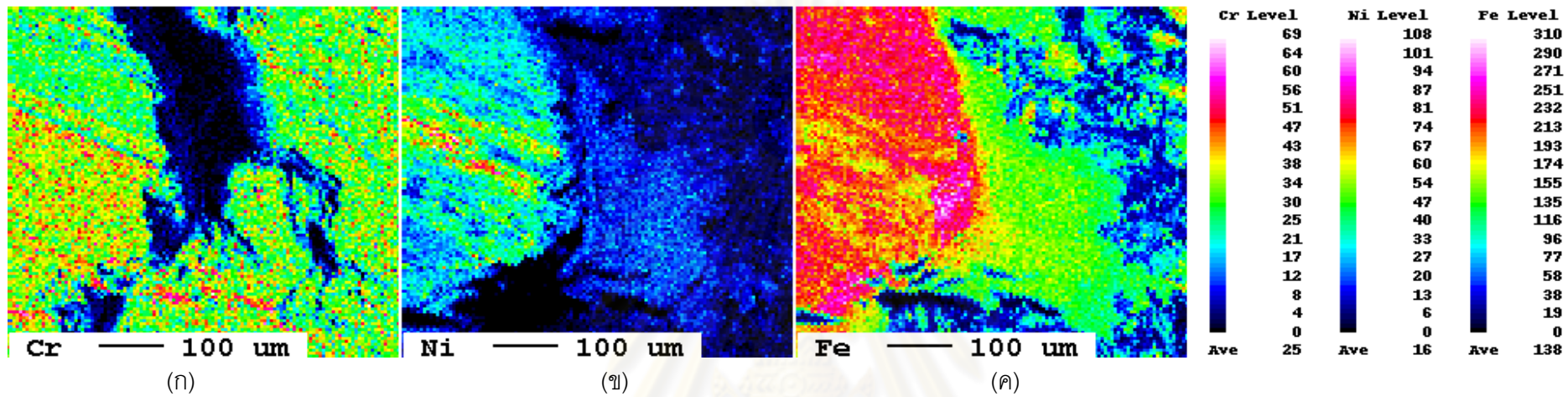
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.19 เหล็กกล้าไร้สนิมเกาะติดบนชั้นเคลือบที่ระยะทางการไหล 576 m แรงกด 320 N และความเร็วการไหล 1.432 m/s รูปจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาดกำลังขยาย 120 เท่า

เกิดการเกาะติดของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมบนชั้นเคลือบปรากฏทางซ้ายของรูปที่ 4.19 ซึ่งมีลักษณะนูนขึ้นจากชั้นเคลือบและทางขวาของรูปแสดงให้เห็นบริเวณผิวที่ไม่มีการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อนำวงแหวนที่หยุดที่ระยะทางการไหล 576 เมตร มาวิเคราะห์ธาตุบริเวณที่เกิดการเกาะติดด้วยเครื่อง Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EPMA) ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.20

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.20 วิเคราะห์ธาตุด้วยเครื่อง EPMA บริเวณที่เกิดการเกาะติดบนชั้นวานเดียมคาร์ไบด์ (ก) Cr (ข) Ni (ค) Fe (ง) V

ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเครื่อง EPMA บริเวณที่เกิดการเกาะติดบนชั้นวานเนเดียมคาร์ไบด์ พบว่าพื้นที่ที่มีการเกาะติดมีธาตุโครเมียม นิกเกิลและเหล็กอยู่ร่วมกันแสดงในรูปที่ 4.20 (ก), (ข) และ (ค) จึงสรุปได้ว่าเป็นบริเวณที่เกิดการเกาะติดของเนื้อของเหล็กกล้าไร้สนิมและบริเวณที่ไม่พบการเกาะติดทางขวางมือของรูปที่ 4.20 (จ) พบว่ามีธาตุวานเนเดียมหนาแน่นซึ่งสรุปได้ว่าเป็นชั้นวานเนเดียมคาร์ไบด์และบนชั้นวานเนเดียมคาร์ไบด์มีธาตุโครเมียมกระจายตัวอยู่โดยไม่ปรากฏว่ามีธาตุเหล็กและนิกเกิลร่วมอยู่ด้วยจึงสรุปได้ว่าเป็นออกไซด์ของโครเมียมที่เกาะติดอยู่บนชั้นวานเนเดียมคาร์ไบด์

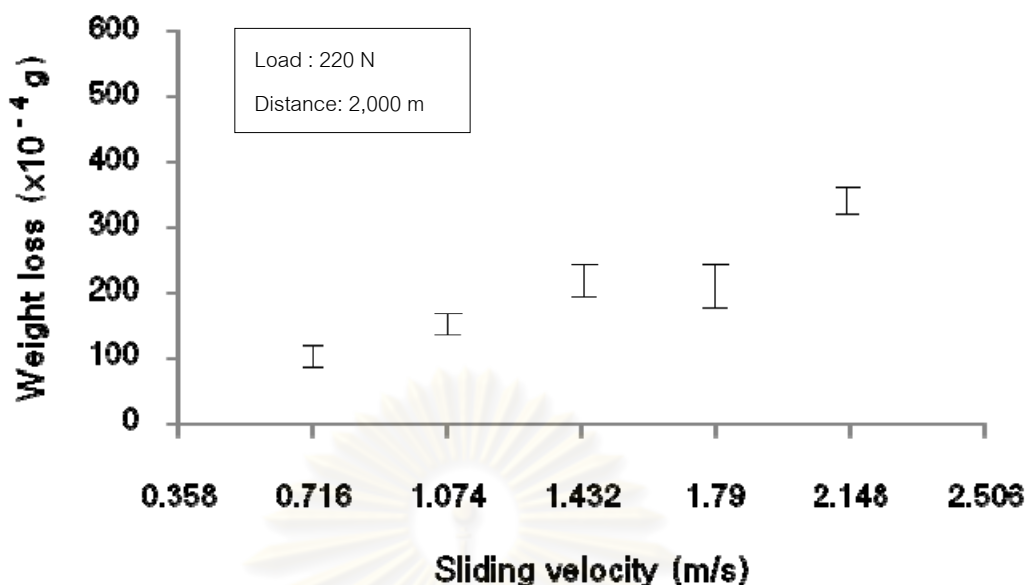
หากปริมาณออกไซด์ของโครเมียมมากกว่าออกไซด์ของเหล็กการเกาะติดอาจเกิดขึ้นน้อยหรือไม่เกิดขึ้นเลย [9] การที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมได้รับแรงกดมาก 320 นิวตันอาจเป็นไปได้ว่าแรงกดที่สูงอาจเร่งการแพร่ของโครเมียมมาที่ผิววงแหวนซึ่งทำให้เกิดออกไซด์ที่มีโครเมียมมากกว่าเหล็ก

ดังนั้นแรงกดจึงเป็นตัวแปรสำคัญของการสูญเสียของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมแต่อย่างไรก็ตามเมื่อให้แรงกดสูงถึง 320 นิวตัน การสูญเสียของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมลดลงได้เนื่องจากเกิดขึ้นออกไซด์ของโครเมียมซึ่งมีความหนาเพียงพอที่จะสามารถต้านทานการเกาะติดได้

4.3 การแปรผันความเร็วการไหลที่แรงกดคงที่

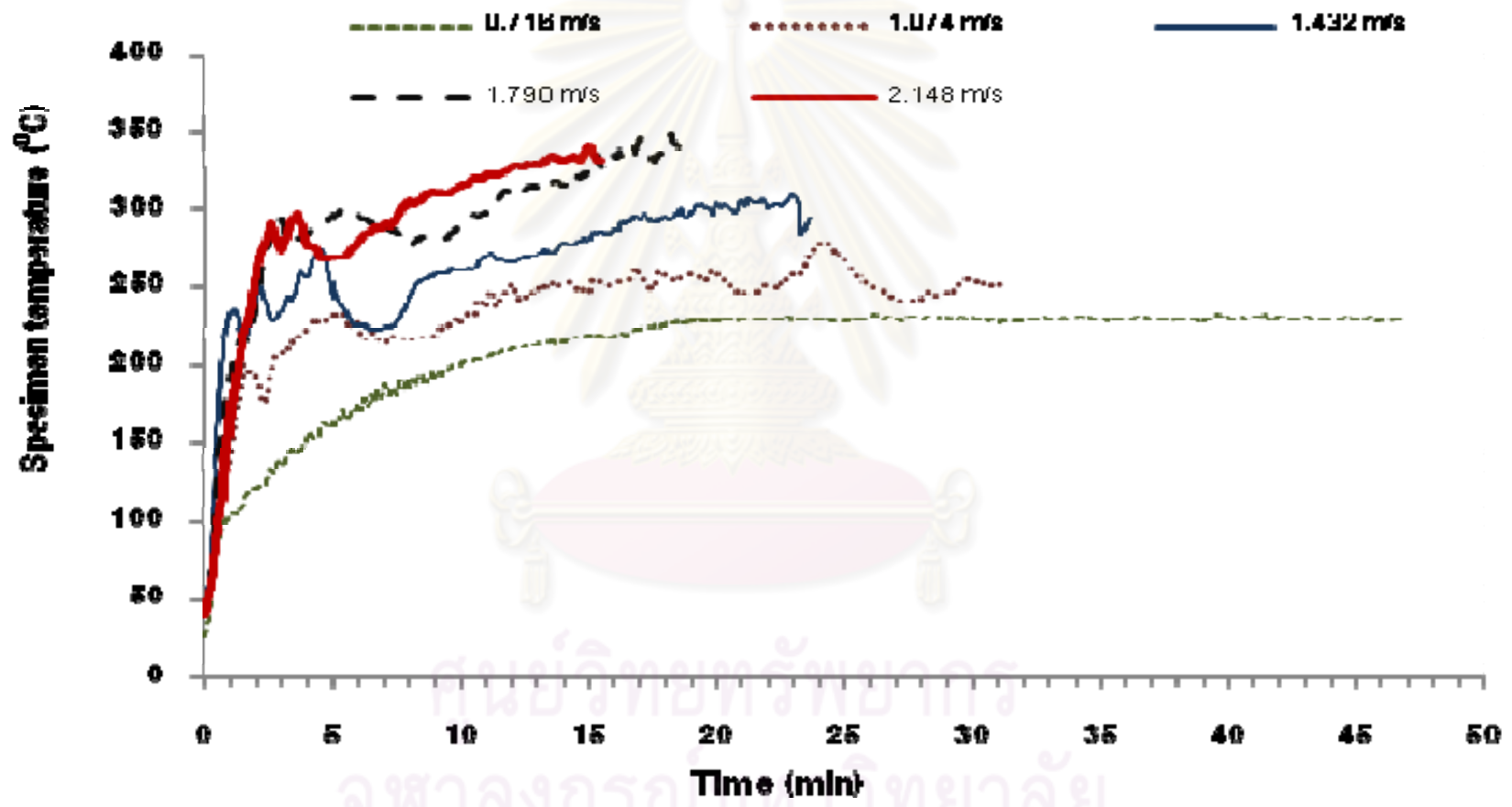
การแปรผันความเร็วการไหลในช่วง 0.716-2.148 เมตร/วินาทีด้วยแรงกด 220 นิวตัน ระยะทางการไหล 2,000 เมตร พบว่าที่ความเร็ว 0.716 เมตร/วินาทีน้ำหนักที่สูญเสียไปของวงแหวนมีค่า 13 มก. และที่ 1.074 เมตร/วินาทีน้ำหนักสูญเสียไปเพิ่มขึ้นเป็น 17 มก. ที่ 1.432 เมตร/วินาทีน้ำหนักวงแหวนที่สูญเสียไปเพิ่มขึ้นเป็น 24 มก. ซึ่งใกล้เคียงกับ 1.790 เมตร/วินาทีและเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นอีกเป็น 2.148 เมตร/วินาทีน้ำหนักวงแหวนที่สูญเสียไปมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 35 มก. แสดงในรูปที่ 4.21

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

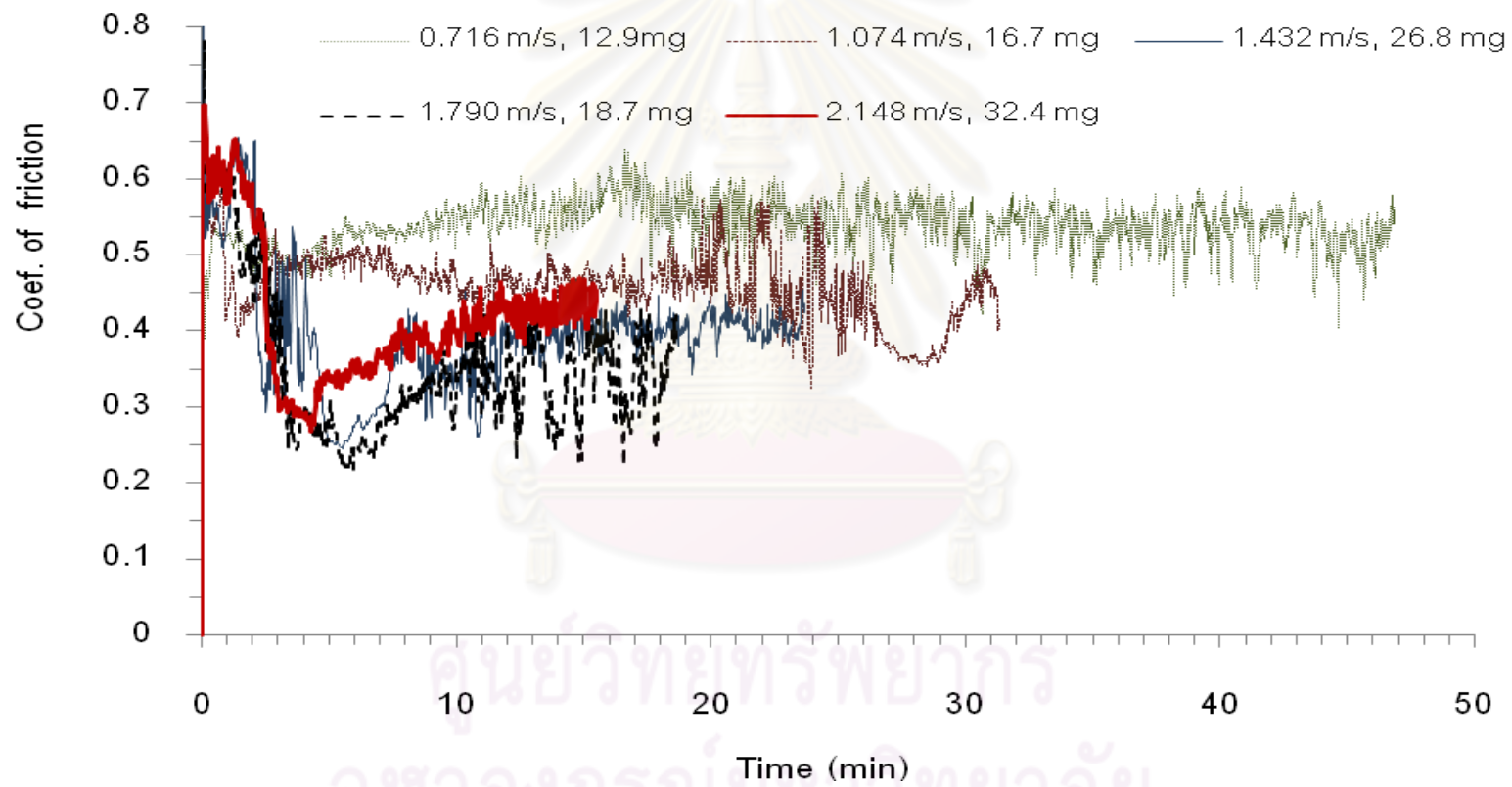


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมที่สูญเสียไปที่ความเร็วต่างๆ

ที่ความเร็วการไถลต่ำ 0.716 เมตร/วินาที ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าประมาณ 0.55 ตั้งแต่แรกจนถึงสิ้นสุดการไถล แสดงว่าการเกาะติดเกิดขึ้นน้อยตั้งแต่แรกและค่อยๆ สะสมจนถึงสิ้นสุดการไถล อุณหภูมิของวงแหวนก็ค่อยๆ เพิ่มขึ้นถึงประมาณ 230°C และคงที่จนถึงสิ้นสุดการไถลแสดงในรูปที่ 4.22 ซึ่งน้ำหนักที่สูญหายไปของเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่าประมาณ 13 มก. ที่ความเร็ว 1.074 เมตร/วินาที ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าประมาณ 0.45 และที่เวลาการไถลตั้งแต่ 20 นาที ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นแล้วลดลงอย่างกะทันหัน ตลอดเวลาจนถึงนาทีที่ 27 นับจากเริ่มการไถลแล้วค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าลดลงจาก 0.45 เป็น 0.35 เป็นเวลาประมาณ 4 นาทีแล้วมีค่าเพิ่มขึ้นอีกเป็น 0.45 อาจเป็นไปได้ว่าการเกาะติดเกิดขึ้นมากตั้งแต่นาทีที่ 20 และเกิดการเกาะติดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงนาทีที่ 27 จากการทดสอบในช่วงนาทีที่ 20-27 ยังพบว่ามีเสียงดังเป็นระยะๆ ก่อนที่เสียงจะเงียบลงในช่วงที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลงเป็น 0.35 ที่ความเร็วการไถล 1.432 เมตร/วินาที ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าสูงในช่วงแรกแล้วลดลงมาที่ 0.25 ช่วงสั้นๆ แล้วสูงขึ้นอีกเป็น 0.4 จนถึงสิ้นสุดการไถลแสดงในรูปที่ 4.23 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสอดคล้องกับอุณหภูมิของเหล็กกล้าไร้สนิมที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วเกือบถึง 300°C ช่วงสั้นๆ แล้วลดลงเป็น 250°C และอุณหภูมิลบขึ้นไปถึงเกือบ 300°C อีกเมื่อสิ้นสุดการไถล น้ำหนักที่สูญหายไปของเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่า 24 มก. ที่ความเร็วการไถล 1.79 เมตร/วินาที กับ 2.148 เมตร/วินาที ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานขึ้นสูงในช่วงแรกแล้วลดต่ำลงอย่างรวดเร็วในช่วงถัดมาเป็นเวลาสั้นๆ แล้วกลับขึ้นไปประมาณ 0.4 จนถึงสิ้นสุดการไถล ซึ่งอุณหภูมิที่ผิวสัมผัสสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในเวลา 3 นาทีและลดลงเล็กน้อยแล้วกลับขึ้นไปสูงอีกจนถึงสิ้นสุดการไถล



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเหล็กกล้าไร้สนิมกับเวลาที่ความเร็วต่างๆ



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับเวลาที่ความเร็วต่างๆและแสดงน้ำหนักที่สูญไปของเหล็กกล้าไร้สนิม

แรงกด 220 นิวตันที่ความเร็วการไหล 1.790 เมตร/วินาทีและ 2.148 เมตร/วินาที
อุณหภูมิของวงแหวนไม่ได้เป็นปัจจัยสำคัญของน้ำหนักที่สูญเสียไป แม้ว่าอุณหภูมิกำลังใกล้เคียงกัน
น้ำหนักที่สูญเสียไปแตกต่างกันได้ ความเร็วการไหลตั้งแต่ 1.432 เมตร/วินาทีขึ้นไปทำให้วงแหวน
เหล็กกล้าไร้สนิมมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าสูงอยู่ อย่างไรก็ตามน้ำหนักเฉลี่ยที่สูญเสียไป
ของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมที่ความเร็ว 1.432 เมตร/วินาทีและ 1.790 เมตร/วินาทียังคงมีค่าใกล้เคียง
กันในช่วง 22-24 มก.จึงเป็นไปได้ว่าผิววงแหวนมีออกไซด์ที่ไม่แตกต่างกันมากนักและอาจเป็นออก
ไซด์ที่มีธาตุโครเมียมมากกว่าเหล็ก จึงเพียงทำให้อุณหภูมิวงแหวนแตกต่างกันตามความเร็วการไหล
แต่ไม่ทำให้การเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมแตกต่างกัน น้ำหนักที่สูญเสียไปจึงใกล้เคียงกัน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิเคราะห์การทดลอง

พฤติกรรมการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแบบ ring-on-disc โดยใช้วงแหวนเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมโกลบนิสค์เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือที่เคลือบผิววานาเดียมคาร์ไบด์ด้วยกระบวนการที่อาร์ทีได้ผลพอสรุปได้ดังนี้

1. น้ำหนักที่สูญเสียไปของเหล็กกล้าไร้สนิมเพิ่มขึ้นตามแรงกดที่เพิ่มสูงขึ้นและที่แรงกดสูง 320 นิวตันมีพฤติกรรมการเกาะติดแตกต่างจากแรงกดที่มีค่าน้อยกว่า โดยทำให้น้ำหนักที่สูญเสียไปของเนื้อของวงแหวนลดลงช่วงระยะเวลาหนึ่งได้ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะแรงกดสูงเร่งการแพร่ของธาตุโครเมียมในเหล็กกล้าไร้สนิมจนกระทั่งเกิดผิวที่มีสมบัติต้านทานการเกาะติดช่วงระยะเวลาหนึ่ง

2. ที่แรงกด 320 N เนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเกิดการเกาะติดมากในช่วงเวลาก่อนที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะลดลงถึง 0.25 โดยน้ำหนักของวงแหวนที่สูญเสียไปของวงแหวนประมาณ 55 มก. และที่ผิวสัมผัสการไหลของวงแหวนที่แรงกด 320 นิวตันความหนาของชั้นออกไซด์ของโครเมียมที่เกิดขึ้นช่วยยับยั้งการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมได้และทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] P. Srichaoroenchai, C. Chongprasitipol and P. Titaram: "Effect of Some Parameters on VC Coating by TRD Process", MSAT-IV, March 31- April 1, 2006, MTEC, Thailand Science Park, pp. 147-149.
- [2] ดร.ปนัดดา นิรนาทล้ำพงศ์, การสึกหรอในงานอุตสาหกรรม (ความรู้เบื้องต้นและการป้องกัน) (2545), สำนักพิมพ์ ส.ส.ท (สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น)
- [3] K.H.R.Wright. Tribology handbook. London: Newnes-Butterworth, 1973
- [4] Morteza Zandrahimi, M. Reza bateni, A. Poladi, Jerzy A. Szpunar: The formation of martensite during wear of AISI 304 stainless steel, Wear, Vol. 263(2007), pp.674-678
- [5] Meng Hua, Xicheng Wei, Jian Li: Friction and wear behavior of sus 304 austenitic stainless steel against Al₂O₃ ceramic ball under relative high load, Wear, Vol. 265(2008), pp.799-810
- [6] B. Podgornik, S. Hogmark, and O. Sandberg: Influence of surface roughness and coating type on the galling properties of coated forming tool steel, Surf. Coat. Technol., 184(2004), pp. 338-348
- [7] B.Podgornik, S.Hogmark, Surface modification to improve friction and galling properties of forming tools, Journal of Materials Processing Technology 174(2006), pp.334-341
- [8] ดนุพล เตื้ออภิสิทธิ์วงศ์, การเคลือบชั้นวาเนเดียม-ไนโอเบียมคาร์ไบด์โดยกระบวนการที่อาร์ดี, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [9] M. Hanson, N. Stavlid, E. Coronel and S. Hogmark: On adhesion and metal transfer in sliding contact between TiN and austenitic stainless steel, Wear, Vol. 264(2008), pp. 781-787
- [10] Instruction manual, Friction wear tester EFM III-1010-ADX, Orientec Co., Ltd., pp.1-36
- [11] J. F. Lin, M. H. Liu and J. D. Wu: Analysis of the friction and wear mechanism of structural ceramic coatings, Wear, Vol. 198(1996), pp. 7-14



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

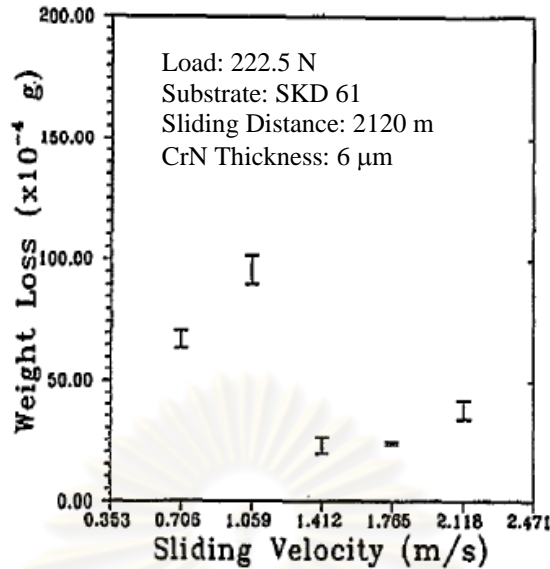
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

J. F. Lin, M. H. Liu and J. D. Wu [11] ศึกษาการสึกหรอของชั้นโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยกระบวนการเคลือบไอทางกายภาพ (PVD) ไทลบนเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยเครื่องทดสอบแบบ thrust-washer ไม่ใช้สารหล่อลื่นภายใต้ความดันบรรยากาศด้วยแรงกด 133.5-267 นิวตันและความเร็วการไถล 0.706-2.118 เมตร/วินาทีจากผลการทดลองพบว่า ที่ความเร็วการไถลเพิ่มขึ้นในช่วง 1.412 - 2.118 เมตร/วินาทีน้ำหนักที่สูญเสียไปของชั้นโครเมียมไนไตรด์ลดลง อาจเป็นไปได้ว่าออกไซด์ของโครเมียมที่เกิดขึ้นที่ผิวชั้นเคลือบมีความหนาแน่นพอจะต้านทานการสึกหรอได้ ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเครื่อง ESCA ดังตารางที่ 21

ตารางที่ ก.1 อัตราส่วนโดยอะตอมสำหรับองค์ประกอบทางเคมี จากเงื่อนไขการทดลอง โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง

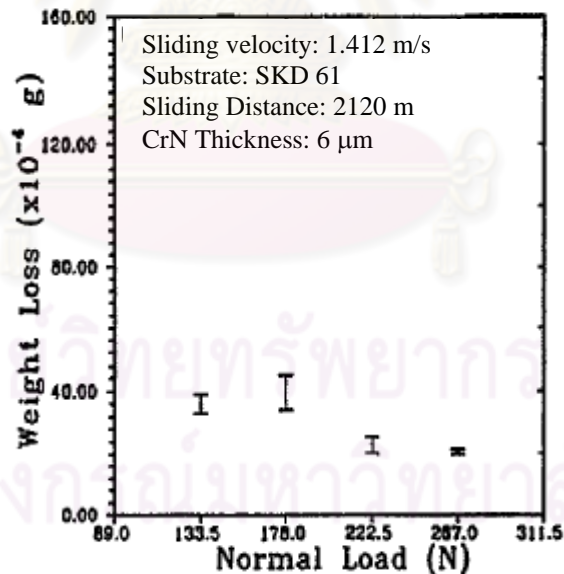
Substrate Material	Material of coating film	Sliding velocity (m.s ⁻¹)	Sliding distance (m)	Applied load (N)	Atomic ratio (%)			
					Fe	Cr	Mo	W
SKH 51	CrN	0.706			80.955	14.458	2.377	2.210
		1.059			63.178	34.335	1.532	0.955
		1.412	2120	222.5	9.312	90.450	0.000	0.238
		1.765			7.499	91.984	0.219	0.298
SKH 51	CrN			133.5	87.749	10.711	2.093	1.447
				178.0	43.313	55.759	0.756	0.172
		1.412	2120	222.5	9.312	90.450	0.000	0.238
				267.0	14.345	84.800	0.381	0.474

จากตาราง ก.1 วิเคราะห์ปริมาณธาตุของผิวชั้นโครเมียมไนไตรด์หลังไถลคู่กับเหล็กกล้าคาร์บอนพบว่า ความเร็วการไถล 1.412 และ 1.765 เมตรต่อวินาทีธาตุโครเมียมที่ผิวของชั้นเคลือบมีปริมาณเพิ่มขึ้นมากโดยมีปริมาณ 90.5% และ 92.0% โดยอัตราส่วนอะตอมตามลำดับ ธาตุเหล็กมีปริมาณลดลงที่ความเร็วการไถล 1.412 และ 1.765 เมตรต่อวินาที โดยมีปริมาณ 9.3% และ 7.5% โดยอัตราส่วนอะตอมตามลำดับ ผิวเคลือบแข็งโครเมียมไนไตรด์สึกหรอน้อยที่ความเร็วการไถลสูงช่วง 1.412-2.118 เมตรต่อวินาทีแสดงในรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 กราฟความสัมพันธ์ของเนื้อชั้นเคลือบที่สูญเสียไปเมื่อความเร็วการไถลเพิ่มขึ้นที่แรงกดคงที่

ในการทำงานเดียวกันถ้าให้แรงกดเพิ่มขึ้นปริมาณการสึกหรอของชั้นโครเมียมไนตรายด์ลดลงได้เพราะอิทธิพลจากออกไซด์ของโครเมียมที่ผิวโครเมียมไนตรายด์แสดงในรูปที่ ก.2

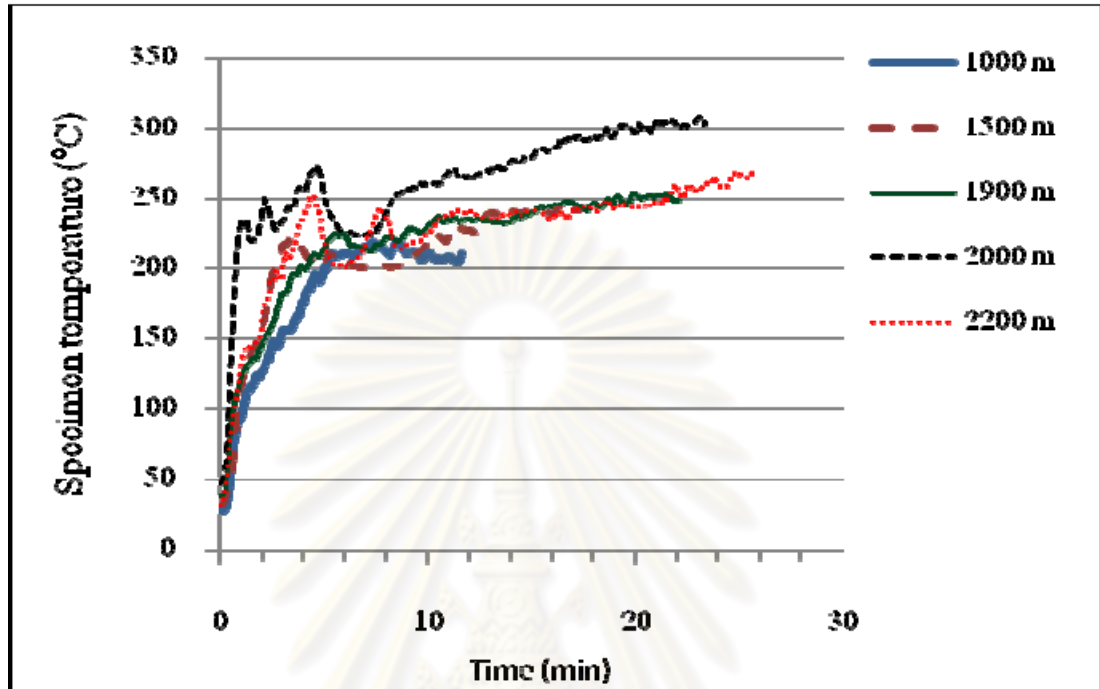


รูปที่ ก.2 เนื้อของชั้นเคลือบผิวแข็งที่สูญเสียไปเมื่อแรงกดมีค่าเพิ่มขึ้นโดยให้ความเร็วไถลคงที่

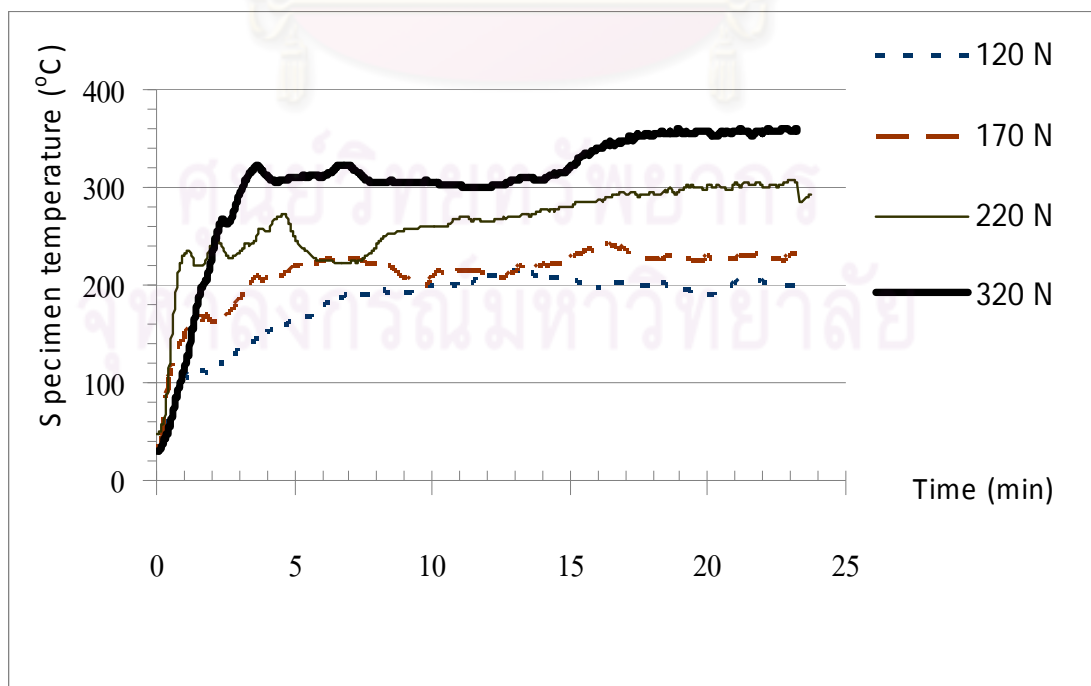
การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าออกไซด์ของโครเมียมที่เกิดขึ้นที่ผิวของชั้นเคลือบที่ความเร็วและแรงกดเพิ่มขึ้นมีอิทธิพลอย่างมากต่อพฤติกรรมการสึกหรอของชั้นเคลือบ

ภาคผนวก ข

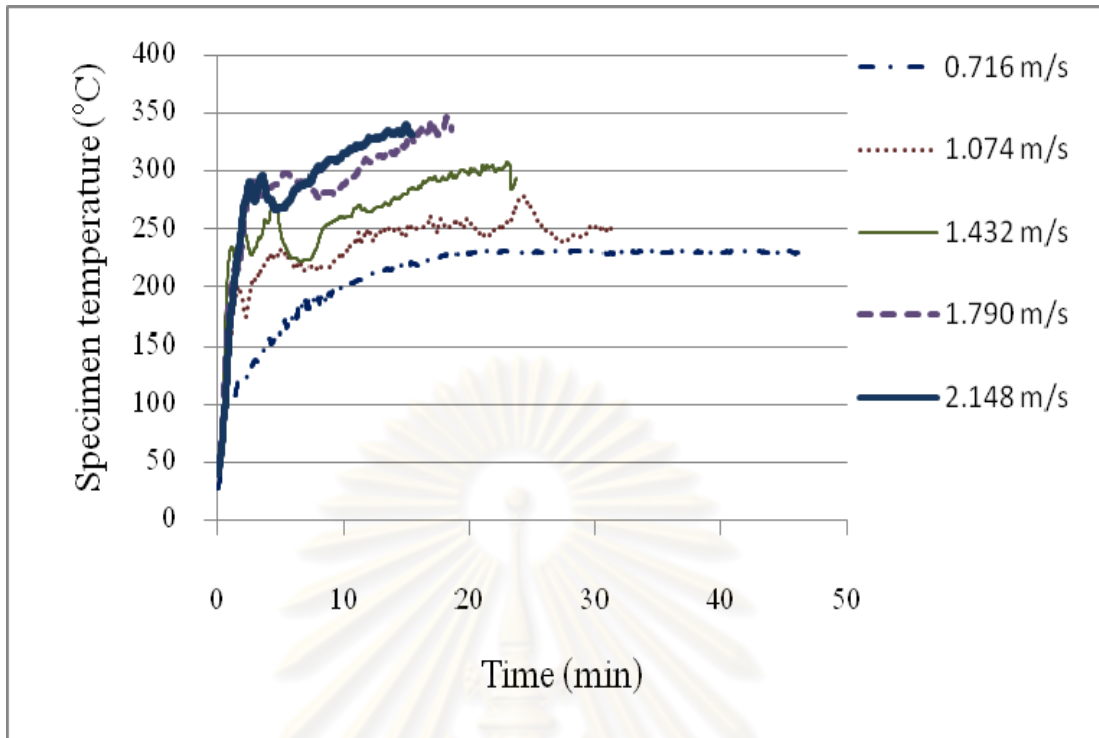
การทดสอบการสึกหรอโดยแปรผันระยะทางไกลช่วง 1,000 – 2,200 เมตร



รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเหล็กกล้าไร้สนิมกับระยะทางการไกล



รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเหล็กกล้าไร้สนิมกับเวลาที่แรงกดต่างๆ



รูปที่ ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเหล็กกล้าไร้สนิมกับเวลาที่ความเร็วการไหลต่างๆ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ – นามสกุล	นายรัชตพล ผิวนิม
วัน – เดือน – ปีเกิด	20 เมษายน 2524
ที่อยู่	12 ซ.เบญจมเทพอุทิศ 6 ถนนคีรีรัฐยา ตำบลคลองกระแซง อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบุรี 76000
วุฒิการศึกษา	มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนพรหมานุสรณ์ จบกการศึกษา ปี 2538 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนพรหมานุสรณ์ จบกการศึกษา ปี 2541 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล จบกการศึกษาปี 2545 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จบกการศึกษาปี 2552
โทรศัพท์ติดต่อ	081-488-1814

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย