

สัมประสิทธิ์ความเสียหายของผิวเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วย
กระบวนการแก๊สซอฟต์แวร์ในทรายดีงและแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดีง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2558

**FRICTION COEFFICIENT OF STEEL SURFACE
TREATED BY GAS SOFT-NITRIDING
AND SULFUR-NITRIDING**

Sirijit Champee



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Master of Engineering in Manufacturing Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2015

สัมประสิทธิ์ความเสียหายของผิวเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการ
แก๊สซอฟต์แวร์ในทรายดิ่งและแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิ่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(อ. ดร.วรรณนัช บุ่งสุด)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.สมศักดิ์ สีวงศ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.ปิยมน พัวพงศกร)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศิริจิตร จำปี : สัมประสิทธิ์ความเสียหายของผิวเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วย
กระบวนการแก๊สซอพท์ไนไตรดิงและแก๊สซัลเฟอร์ไนไตรดิง (FRICTION
COEFFICIENT OF STEEL SURFACE TREATED BY GAS SOFT-NITRIDING AND
SULFUR-NITRIDING) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์, 91 หน้า

ในการผลิตเชิงพาณิชย์และเชิงอุตสาหกรรมมักนิยมใช้เหล็กกล้าที่มีราคาถูกและสามารถ
ขึ้นรูปได้ง่าย เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ และเหล็กกล้าผสมคาร์บอนต่ำ มาผลิตเป็นชิ้นงานแล้วจึงใช้
กระบวนการปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีการทางความร้อน กระบวนการปรับปรุงสมบัติเหล็กกล้า
สามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะสถานะที่นำไปใช้งาน ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายเป็น
สมบัติที่สำคัญอันหนึ่งซึ่งส่งผลกระทบต่อการใช้งาน เช่นการประกอบ การเคลื่อนไหวของ
ผลิตภัณฑ์ ในงานวิจัยนี้เลือกกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซึ่งเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่นิยมใน
ภาคอุตสาหกรรม วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงมุ่งค้นคว้าและวิจัยผลกระทบของความเรียบผิวของ
เหล็กกล้าต่อการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซอพท์ไนไตรดิงและแก๊สซัลเฟอร์ไนไตรดิง
รวมถึงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายผิวเหล็กกล้า ขึ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนและคาร์บอนผสม
AISI 1010, 1020, 1040, 4140 และ 4340 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีอบปกติเพื่อคลายความเค้น
และทำความสะอาดผิวด้วยการยิงเม็ดโลหะ จากนั้นนำไปเตรียมผิวโดยแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ
การยิงด้วยเม็ดโลหะ (Shot blasting), การยิงด้วยเม็ดโลหะและขัดด้วยกระดาษทราย เบอร์ 2000
(Shot blasting+Grinding) และ การยิงด้วยเม็ดโลหะและการขัดผิวด้วยอะลูมินา (Shot
blasting+Polishing) จากนั้นนำไปสู่กระบวนการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซอพท์ไนไตรดิง
และแก๊สซัลเฟอร์ไนไตรดิง ผลการทดลองพบว่า กระบวนการเตรียมผิวที่ผ่านการขัดผิวด้วยอะลูมิ
นาซึ่งมีความเรียบผิวที่ดีมาก ชั้นผิวขาวไม่สามารถสร้างได้บนชิ้นทดสอบในขณะที่การเตรียมผิว
แบบ Shot blasting และ Shot blasting+grinding นั้นสามารถสร้างชั้นผิวขาวได้ และพบว่าความ
หยาบผิวที่แตกต่างกันทั้งสองแบบนี้ไม่ส่งผลต่อทั้งความหนาชั้นผิวขาว และค่าความแข็งผิวอย่าง
มีนัยสำคัญ ในส่วนของผลค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายพบว่า เหล็กกล้าผสมที่ผ่านกระบวนการ
แก๊สซอพท์ไนไตรดิงมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายผิวที่สูงกว่ากระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ไนไตรดิง
โดยที่เหล็กกล้าผสม AISI 4340 มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่ต่ำกว่าชิ้นทดสอบอื่น ๆ
ในทั้งกระบวนการแก๊สซอพท์ไนไตรดิงและแก๊สซัลเฟอร์ไนไตรดิง

สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต
ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

SIRIJIT CHAMPEE : FRICTION COEFFICIENT OF STEEL SURFACE

TREATED BY GAS SOFT-NITRIDING AND SULFUR-NITRIDING.

THESIS ADVISOR : SOMSAK SIWADAMRONGPONG, Ph.D., 91 PP.

FRICTION COEFFICIENT OF STEEL SURFACE TREATED BY GAS SOFT-NITRIDING AND SULFUR-NITRIDING

For the commercial and industrial manufacturing commonly use the cheap and good formability steel for making product such as low carbon steel, low carbon alloy steel. Then, the several heat treatment processes are carried on to improve the material properties after forming process upon a product application. The friction coefficient, one of important properties, is influenced to assembly processes and also movement of product parts. Therefore, this research was to study the effect of surface roughness and friction coefficient of steels, AISI 1010, 1020, 1040, 4140 and 4340, treated by gas soft-nitriding and gas sulfur-nitriding. The specimen was treated by normalizing and prepared in 3 case of surface roughness before treated by gas soft-nitriding and gas sulfur-nitriding. The result was indicated that in case of polished specimen, white layer was not found on the very smooth surface. On the other hand, the similar properties of steel hardness and white layer thickness were found on the shot blasted and ground specimen. For friction coefficient results, the steels which treated by soft-nitriding were represented the higher coefficient. AISI 4340 was found the lowest friction coefficient among the specimen of steel in both treatment processes.

School of Manufacturing Engineering.

Academic Year 2015

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ทั้งด้านวิชาการ และการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

อาจารย์ ดร. สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้โอกาสทางการศึกษา วิชาความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษาต่าง ๆ มอบคำสอนที่ดีในการดำรงชีวิต และคอยเตือนสติอยู่เสมอ อีกทั้งยังช่วยแนะแนวทางแก้ปัญหาในการทำงานวิจัยมาโดยตลอด จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ ดร.ปิยมน พัวพงศกร อาจารย์ ดร.วรรณนัช บุ่งสุด และคณาจารย์ประจำสาขาวิชาการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ช่วยให้คำแนะนำ และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

บุคลากรประจำสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมโลหการและบุคลากรประจำสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ตลอดจนบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้อำนวยความสะดวกในการทำวิจัยทั้งทางด้านเอกสาร ข้อมูล และอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี บริษัท ไทยโตเคนเทอร์โม จำกัด และคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาคณะวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ในการทำวิจัย รวมทั้งข้อมูลที่เป็นต่องานวิจัย ตลอดจนคำแนะนำต่าง ๆ

สุดท้ายนี้ คุณงามความดีอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแต่บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพยิ่ง และคณาจารย์ผู้ประสาทวิชาความรู้ ตลอดจนทุก ๆ ท่านที่ให้กำลังใจช่วยเหลือจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงด้วยดี

ศิริจิตร จำปี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย.....	2
1.5 สถานที่ทำงานวิจัย.....	2
1.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.7 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 เหล็กกล้า.....	4
2.2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน.....	4
2.2.2 เหล็กกล้าผสม.....	5
2.2.2.1 ชนิดของเหล็กกล้าผสม (Classificational of alloy steels).....	6
2.3 บทบาทของธาตุที่มีผลต่อการชุบแข็ง.....	7
2.4 การอบปกติเพื่อปรับปรุงสมบัติของเหล็ก (Normallizing).....	9

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5	การชุบแข็งผิว (Surface Hardening)	10
2.5.1	การชุบแข็งผิวโดยกรรมวิธีซอพต์ไนตรายดิ้ง (Soft-nitriding).....	11
2.5.2	การชุบแข็งผิวโดยกรรมวิธีซัลเฟอร์ไนตรายดิ้ง (Sulfur-nitriding)	12
2.6	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction Coefficient)	12
2.6.1	แรงเสียดทานชนิดแห้ง (Dry Friction).....	13
2.7	การสึกหรอ	16
2.7.1	กลไกการสึกหรอ.....	16
2.7.2	ลักษณะของคูผิวสัมผัส.....	18
2.7	การทดสอบคุณสมบัติของชิ้นทดสอบ.....	19
2.8.1	การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส	19
2.8.2	การศึกษาโครงสร้างของโลหะ	20
2.8.3	เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	20
2.8.4	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด.....	20
2.8.5	เครื่องทดสอบการสึกหรอ pin on disc.....	21
2.9	การวิเคราะห์ทางสถิติ	22
2.9.1	การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing).....	23
2.9.2	สหสัมพันธ์ (Correlation).....	24
2.9.3	การวิเคราะห์ถดถอย (Regression Analysis).....	26
2.9	ปริทรรศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	28
3	วิธีการดำเนินการวิจัย	31
3.1	กล่าวนำ.....	31
3.2	การเตรียมแผ่นทดสอบ.....	32
3.3	การเตรียมชิ้นทดสอบ	33
3.2.1	เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง	33
3.2.2	เหล็กกล้าผสม	33
3.2.3	การปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการอบปกติ	34

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4	การเตรียมผิวชั้นทดสอบ	35
3.4.1	การพ่นทำความสะอาดผิวชั้นทดสอบ	35
3.4.2	การขัดผิวชั้นทดสอบ.....	36
3.4.2	กระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส.....	37
3.5	การตรวจสอบ โครงสร้างชั้นผิวขาว.....	38
3.6	การวิเคราะห์ค่าความแข็ง	39
3.7	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี	40
3.8	การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก.....	41
3.9	การวิเคราะห์และศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (pin on disc)	42
3.10	การวิเคราะห์และศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจากเครื่องประดิษฐ์	44
3.10.1	ขั้นตอนการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	45
3.10.2	อุปกรณ์เครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	46
3.11	การวิเคราะห์รอยที่เกิดจากการสึกหรอ	48
4	ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล.....	50
4.1	กล่าวนำ.....	50
4.2	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี.....	51
4.3	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก.....	52
4.4	ผลการวิเคราะห์ค่าความแข็ง.....	54
4.4.1	ผลจากความหยาบผิวที่แตกต่างกันกระบวนการแก๊สซอพตี้ในทรายดิง....	54
4.4.2	ผลจากความหยาบผิวที่แตกต่างกันกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง..	55
4.4.3	ผลจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่างกันในกระบวนการชุบแข็งต่างกัน	57
4.4.3.1	กระบวนการแก๊สซอพตี้ในทรายดิง	58
4.4.3.2	กระบวนการแก๊สซอพตี้ในทรายดิง	59
4.4.4	ผลจากเหล็กกล้าผสมส่วนผสมต่างกันในกระบวนการชุบแข็งต่างกัน.....	60
4.4.4.1	กระบวนการแก๊สซอพตี้ในทรายดิง	60
4.4.4.2	กระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง	61

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างชั้นผิวขาว	62
4.5.1	ผลจากความหยาบผิวที่แตกต่างกันกระบวนการแก๊สซอพต์ในทรายดิง.....	62
4.5.2	ผลจากความหยาบผิวที่แตกต่างกันกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง..	64
4.5.3	ผลจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่างกันในกระบวนการชุบแข็งผิวต่างกัน	66
4.5.3.1	กระบวนการแก๊สซอพต์ในทรายดิง	66
4.5.3.2	กระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง	67
4.5.4	ผลจากเหล็กกล้าผสมส่วนผสมต่างกันในกระบวนการชุบต่างกัน	68
4.5.4.1	กระบวนการแก๊สซอพต์ในทรายดิง	68
4.5.4.2	กระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง	69
4.6	ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	70
4.6.1	ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านการชุบแข็งผิวแก๊สซอพต์ในทรายดิงและซัลเฟอร์ในทรายดิง.....	70
4.6.2	ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในกลุ่มเหล็กกล้าผสมที่ผ่านการชุบแข็งผิวแก๊สซอพต์ในทรายดิงและซัลเฟอร์ในทรายดิง.....	71
4.7	ผลการวิเคราะห์สัมพันธะระหว่างเครื่อง pin on disc และ เครื่องประดิษฐ์	73
4.7.1	ความสัมพันธะระหว่าง Pin on disc เทียบกับ Friction Machine	73
4.8	ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธะค่าความแข็งผิวและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน .	75
4.8.1	ความสัมพันธะระหว่างค่าความแข็งและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน กระบวนการแก๊สซอพต์ในทรายดิง	75
4.8.2	ความสัมพันธะระหว่างค่าความแข็งและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน กระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง	77
4.9	ผลการวิเคราะห์สภาพผิวภายผิวขึ้นทดสอบ	78
4.7.1	สภาพผิวขึ้นทดสอบก่อนการทดสอบ pin on disc	79
4.7.2	สภาพผิวขึ้นทดสอบหลังการทดสอบ pin on disc.....	80
5	บทสรุป.....	82
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	82

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	83
รายการอ้างอิง	84
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	86
ประวัติผู้เขียน	91

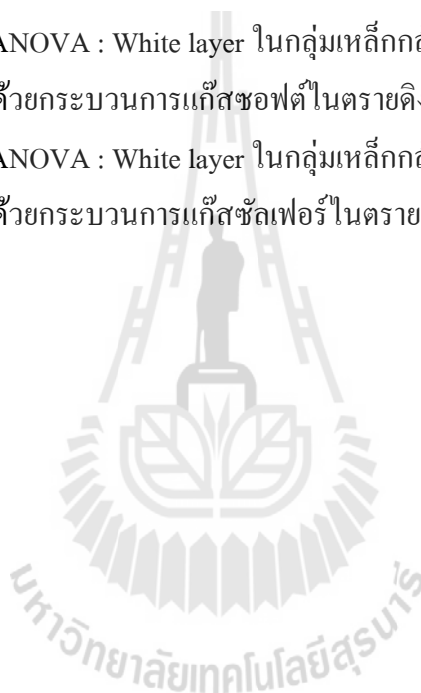


สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	แสดงค่าที่บอกสภาพ ลักษณะ และคุณสมบัติของประชากร..... 23
2.2	แสดงค่าที่บอกสภาพ ลักษณะ และคุณสมบัติของประชากร(correlation) 24
3.1	แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น (%wt, Balance Fe) 32
3.2	แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม (%wt, Balance Fe) 33
3.3	แสดงเงื่อนไขการอบปกติที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจาก AISI 1010, AISI 1020, AISI 1040, AISI 4140, AISI 4340..... 34
4.1	ตารางแสดงผลส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าตามมาตรฐาน (%wt, Balance Fe) 51
4.2	ตารางแสดงผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า (%wt, Balance Fe) 51
4.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Surface hardness กับ ประเภทของชิ้นทดสอบ ในกระบวนการแก๊สซอฟต์ในทรายดิ่ง.....55
4.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Surface hardness กับ ประเภทของชิ้นทดสอบ ในกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิ่ง..... 57
4.5	แสดงผล One-way ANOVA : Surface hardness ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซอฟต์ในทรายดิ่ง.....58
4.6	แสดงผล One-way ANOVA : Surface hardness ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิ่ง..... 59
4.7	แสดงผล One-way ANOVA : Surface hardness ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซอฟต์ในทรายดิ่ง..... 60
4.8	แสดงผล One-way ANOVA : Surface hardness ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิ่ง..... 61
4.9	แสดงผล One-way ANOVA : White layer ในประเภทชิ้นทดสอบ ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซอฟต์ในทรายดิ่ง..... 63
4.10	แสดงผล One-way ANOVA : White layer ในประเภทชิ้นทดสอบ ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิ่ง..... 64

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11 แสดงผล One-way ANOVA : White layer ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซอฟต์ในทรายดิ่ง.....	66
4.12 แสดงผล One-way ANOVA : White layer ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิ่ง.....	67
4.13 แสดงผล One-way ANOVA : White layer ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซอฟต์ในทรายดิ่ง.....	68
4.14 แสดงผล One-way ANOVA : White layer ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิ่ง.....	69



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภูมิการอบปกติ	9
2.2 แบบจำลองกรรมวิธีแก๊สซอพต์ในทรายคิง	11
2.3 แบบจำลองกรรมวิธีแก๊สซัลเฟอร์ในทรายคิง	12
2.4 แสดงมวลที่มีแรงดัน P ดึงไปบนพื้นราบ	13
2.5 แสดงตำแหน่งของแรง N ก่อนที่มวลจะล้มนลง	13
2.6 แสดงส่วนขยายของพื้นผิวสัมผัสระหว่างมวลกับพื้นหยาบ	14
2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึง (P) และแรงเสียดทาน (F)	15
2.8 การสึกหรอแบบต่าง ๆ	17
2.9 การเสียดสี	18
2.10 แสดงการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส	19
2.11 ส่วนประกอบของเครื่องไมโครไตรโบโลยีแบบ Pin on disc	22
3.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	32
3.2 ชั้นทดสอบทรงกระบอก	35
3.3 เครื่องพ่นทำความสะอาดผิวชั้นทดสอบ	36
3.4 ความหยาบผิวชั้นทดสอบ	36
3.5 แสดงกระบวนการชุบแข็งผิวที่ใช้ในการทดลอง	38
3.6 แสดงลักษณะของบริเวณที่เกิดการแทรกซึมในโตรเจนและโครงสร้างผิวขาว	39
3.7 แสดงหลักการทดสอบแบบวิกเกอร์ส	40
3.8 เครื่อง Optical emission spectrometer รุ่น ARL 3460 METALS ANALYZER	41
3.9 เครื่อง X-Ray diffraction รุ่น D8 Advance	42
3.10 เครื่องมือทดสอบ pin on disc (เครื่องธรรมชาติ)	43
3.11 เครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน Friction Machine	44
3.12 เครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน Friction Machine (Wire Frame)	44
3.13 แสดงการติดตั้งเครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับ เครื่อง UTM	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 แสดงการติดตั้งเครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับ เครื่อง UTM โดยการใส่ก้อนน้ำหนักรีด.....	46
3.15 แสดงโปรแกรม Friction จาก instron เครื่อง Universal Testing Machine.....	47
3.16 ชุดอุปกรณ์ประกอบฐานที่ใช้ขึ้นทดสอบในระหว่างทำการทดสอบ.....	47
3.17 รอกที่ใช้ติดตั้งกับตัวเครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน.....	48
3.18 รอกที่ใช้ติดตั้งกับตัวเครื่อง UTM.....	48
3.19 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน SEM.....	49
4.1 กราฟแสดงผลการตรวจสอบการวิเคราะห์ด้วย XRD ด้วยกระบวนการแก๊สซอพต์ในทรายดิง.....	52
4.2 กราฟแสดงผลการตรวจสอบการวิเคราะห์ด้วย XRD ด้วยกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง.....	53
4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Surface hardness กับ ประเภทของขึ้นทดสอบใน กระบวนการแก๊สซอพต์ในทรายดิง.....	54
4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Surface hardness กับ ประเภทของขึ้นทดสอบใน กระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง.....	55
4.5 แสดงความสัมพันธ์ของ Surface hardness ในกระบวนการอบชุบต่าง ๆ กลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน.....	57
4.6 แสดงความสัมพันธ์ของ Surface hardness ในกระบวนการอบชุบต่าง ๆ กลุ่มเหล็กกล้าผสม.....	60
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ White layer และประเภทของขึ้นทดสอบ กระบวนการแก๊สซอพต์ในทรายดิง.....	62
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ White layer และประเภทของขึ้นทดสอบ กระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง.....	64
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ White layer ที่ผ่านกระบวนการอบชุบต่าง ๆ ในเหล็กกล้าคาร์บอน.....	65
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ White layer ที่ผ่านกระบวนการอบชุบต่าง ๆ ในเหล็กกล้าผสม.....	68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับเหล็กกล้าคาร์บอนที่นำไปชุบแข็งในกระบวนการต่าง ๆ.....	70
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับเหล็กกล้าผสมที่นำไปชุบแข็งในกระบวนการต่าง ๆ.....	71
4.13 ผลการวิเคราะห์ Correlation และ Regression ของเครื่องทดสอบ Pin on disc และเครื่อง Friction Machine.....	73
4.14 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ Correlation และ Regression ของเครื่องทดสอบ Pin on disc และเครื่อง Friction Machine.....	74
4.15 ผลการวิเคราะห์ Regression ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและความแข็งผิว (Surface hardness) กระบวนการแก๊สซอฟต์ในทรายดิ่ง.....	75
4.16 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ Regression ของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและค่าความแข็งผิวกระบวนการแก๊สซอฟต์ในทรายดิ่ง.....	76
4.17 ผลการวิเคราะห์ Regression ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและความแข็งผิว (Surface hardness) กระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิ่ง.....	77
4.18 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ Regression ของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและค่าความแข็งผิวกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิ่ง.....	78
4.19 แสดงภาพถ่าย SEM (Scanning electron microscope) สภาพผิวหน้าของหมุดขึ้นทดสอบก่อนการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน.....	79
4.20 แสดงภาพถ่าย SEM (Scanning electron microscope) พื้นผิวการสึกหรอภายหลังการทดสอบ Pin on disc.....	80
4.21 แสดงภาพถ่าย SEM (Scanning electron microscope) พื้นผิวการสึกหรอภายหลังการทดสอบ Pin on disc.....	81

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

α	=	Ferrite
γ	=	Austenite
γ'	=	Fe_4N
ϵ	=	Fe_{2-3}N
AISI	=	American Iron and Steel Institute
ANOVA	=	Analysis of Variance
ASM	=	American Society for Metals
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
BCC	=	Body Centered Cubic
Deg.	=	Degree
FCC	=	Face Centered Cubic
HCP	=	Hexagonal Close Packed
HV	=	Vickers hardness
mm	=	Millimeter
OES	=	Optical emission spectrometer
SEM	=	Scanning Electron Microscope
SN	=	Soft nitriding
SUL	=	Sulfur nitriding
UTM	=	Universal testing machine
UTS	=	Ultimate tensile strength
XRD	=	X-ray diffraction

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการผลิตเชิงพาณิชย์และเชิงอุตสาหกรรมมักนิยมใช้เหล็กกล้าที่มีราคาถูกและสามารถขึ้นรูปได้ง่าย เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ มาผลิตเป็นชิ้นงานแล้วจึงใช้กระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ ซึ่งการปรับปรุงคุณสมบัติเหล็กกล้าสามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะสถานะที่นำไปใช้งาน ความแข็งแรงที่ต้องการและที่สำคัญคือชนิดของเหล็กกล้าที่นำมาใช้ เหล็กกล้าที่มีใช้ในอุตสาหกรรมมีหลากหลายเกรดและชนิด ขึ้นกับคุณสมบัติที่ผู้ออกแบบต้องการ อย่างไรก็ตามเนื่องจากเหล็กกล้าเกรดที่มีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติพิเศษในด้านอื่น ๆ เช่น ทนการกัดกร่อน มีความแข็งแรงสูง ด้านทานการสึกหรอ และปรับปรุงสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมักมีต้นทุนการผลิตสูงเนื่องจากราคาวัสดุและค่าดำเนินการขึ้นรูปโดยเฉพาะอย่างยิ่งการปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผิวชิ้นงานซึ่ง มักจะมีกระบวนการผลิตที่ยุ่งยาก มีปัจจัยเกี่ยวข้องเป็นจำนวนมาก และมีต้นทุนค่าเครื่องจักรกลสูง

คุณสมบัติค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและ ความเรียบผิว เป็นคุณสมบัติที่สำคัญอันหนึ่ง ที่ส่งผลกระทบต่อการใช้งาน เช่น การประกอบ การเคลื่อนไหว รวมไปถึงการใช้พลังงานของผลิตภัณฑ์และการปรับปรุงสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรม กระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สมีอยู่หลายวิธีการด้วยกัน เช่น ซอฟต์ไนไตรดิง และ ชัลเฟอร์ไนไตรดิง เป็นต้น กระบวนการแก๊สซอฟต์ไนไตรดิง และแก๊สชัลเฟอร์ไนไตรดิง อาศัยหลักการสร้างชั้นผิวแข็งที่เรียกว่า White layer เคลือบผิวชิ้นงานไว้ ซึ่งแต่ละวิธีที่กล่าวมานี้จะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผิวชิ้นงานด้วยเช่นกัน โดยเหล็กกล้าแต่ละประเภทก็จะเหมาะสมกับกระบวนการชุบแข็งผิวที่แตกต่างกันไป

สำหรับงานวิจัยได้เล็งเห็นถึงความสำคัญและประโยชน์ของเหล็กกล้าใช้งานกันอย่างกว้างขวางที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติให้เหมาะสมกับสถานะที่ต้องการได้จึงได้ทำการค้นคว้าศึกษาวิจัยและทำการทดลองกระบวนการต่อความเรียบผิวและคุณสมบัติค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของเหล็กกล้า ซึ่งประกอบไปด้วย 2 กระบวนการคือ ซอฟต์ไนไตรดิง และแก๊สชัลเฟอร์ไนไตรดิงว่าจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้าง และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของเหล็กกล้า

อย่างไร โดยคาดว่าจะนำไปศึกษาต่อยอดในด้านวิชาการ และสามารถนำไปประยุกต์ในกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมอื่น ๆ ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาผลกระทบของความเรียบผิวของเหล็กกล้าต่อการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซอพท์ไนตรายดิงและแก๊สซัลเฟอร์ไนตรายดิง และวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายผิวเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซอพท์ไนตรายดิงและแก๊สซัลเฟอร์ไนตรายดิง

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ศึกษาผลกระทบของความเรียบผิวจากการเตรียมชิ้นทดสอบเหล็กกล้าก่อนการชุบแข็งด้วยกระบวนการแก๊สซอพท์ไนตรายดิง แก๊สซัลเฟอร์ไนตรายดิง ต่อโครงสร้าง ความหนาชั้นผิวขาว และความแข็งผิว

1.3.2 ศึกษาอิทธิพลการอบชุบด้วยกระบวนการแก๊สซอพท์ไนตรายดิง และแก๊สซัลเฟอร์ไนตรายดิง ของเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม AISI 1010, 1020, 1040, 4140 และ 4340

1.3.3 ศึกษาสัมประสิทธิ์ความเสียหายของเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการ แก๊สซอพท์ไนตรายดิง และแก๊สซัลเฟอร์ไนตรายดิง

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้ ทฤษฎี และเอกสารที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ออกแบบชิ้นทดสอบ และกระบวนการทดลองที่เหมาะสมกับชิ้นทดสอบ

1.4.3 ทำการทดลองตามกระบวนการที่ได้ออกแบบ

1.4.4 วิเคราะห์การทดลอง

1.4.5 สรุปผลการทดลอง

1.5 สถานที่ทำวิจัย

บริษัทไทยโตเคนเทอร์โม จำกัด นิคมอุตสาหกรรมอมตะนคร จังหวัดชลบุรี
อาคารเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) เตาชุบแข็งผิวอาคารเครื่องมือ 6 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ใช้ทำกระบวนการอบปกติ
- 2) เตาชุบแข็งผิวของบริษัทไทยโตเคนเทอร์โม จำกัด ใช้ทำกระบวนการแก๊สซอพต์ในทรายดิง, แก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง
- 3) เครื่อง Shot blast ของ Gkowell รุ่น GW-10 สำหรับทำความสะอาดผิวของชิ้นงานที่ผ่านการอบปกติ
- 4) เครื่องวัดความหยาบผิว สำหรับวัดค่าความหยาบผิว
- 5) เครื่องวัดค่าความแข็ง Micro hardness vicker testing ของ Future-Tech รุ่น FM-700 ใช้สำหรับวัดค่าความแข็งผิวของชิ้นทดสอบ
- 6) เครื่อง X-ray diffractometer (XRD) รุ่น D8 Advance ใช้วิเคราะห์โครงสร้างสารประกอบชิ้นทดสอบ
- 7) เครื่องทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน pin on disk tribometer ของ Anton Paar รุ่น TRN
- 8) เครื่อง Optical emission spectrometer (OES) ARL 3460 METALS ANALYZER ใช้ตรวจวิเคราะห์ธาตุประกอบในชิ้นทดสอบ
- 9) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning electron microscopy : SEM) ของ JEOL รุ่น JSM6010LV ใช้ในการศึกษาสัณฐานวิทยาและรายละเอียดของการสึกหรอของพื้นผิวของชิ้นทดสอบจากการทดสอบแรงเสียดทาน

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เข้าใจถึงผลการอบชุบชิ้นทดสอบจากกระบวนการอบชุบแก๊สซอพต์ในทรายดิงและแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิงว่ามีผลกระทบอย่างไรต่อโครงสร้างชิ้นทดสอบ
- 2) เข้าใจถึงการนำไปประยุกต์ใช้ในการเลือกวัสดุและกรรมวิธีการปรับปรุงผิววัสดุในเรื่องค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

การศึกษาทฤษฎีบทและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้มีการรวบรวมไว้และนำเสนอในบทนี้เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับงานวิจัยฉบับนี้ โดยศึกษาจากเอกสารงานวิจัยที่เคยตีพิมพ์ วิทยานิพนธ์ หนังสือ สารสนเทศ และเอกสารอื่น ๆ ทั้งนี้การนำเสนอในบทนี้แบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโลหะวิทยาด้านการชุบแข็งผิวโลหะและงานวิจัยที่ผ่านมา

ส่วนแรกเป็นการเรียบเรียงเนื้อหาด้านเหล็กกล้าและการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ ซึ่งเป็นหลักการเตรียมชิ้นงานทดสอบ รวมไปถึงทฤษฎีเกี่ยวกับการชุบแข็งผิวผ่านกระบวนการแก๊สซอพท์ไนตรายดิงและแก๊สซัลเฟอร์ไนตรายดิง อันเป็นกระบวนการต้นสำหรับงานวิจัยที่ศึกษาอยู่ และการทดสอบสมบัติตามจุดประสงค์งานวิจัย

ส่วนที่สองเป็นการนำเสนอบทสรุปงานวิจัยในอดีต พบว่ากระบวนการอบชุบผิวด้วยแก๊สทั้งสองกระบวนการให้ผลที่แตกต่างกันจากขอบเขตการทดสอบหลายรูปแบบ จึงนำไปสู่งานวิจัยฉบับนี้ที่มุ่งเน้นการศึกษาผลกระทบด้านสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

2.2 เหล็กกล้า (Steel)

เหล็กกล้า เป็นโลหะผสมของ Fe กับ C (Fe-C alloys) ที่มีการผลิตเป็นจำนวนมากกว่าโลหะชนิดอื่น นอกจาก C ซึ่งเป็นธาตุผสมที่สำคัญที่เพิ่มความแข็งแรงแก่เหล็กแล้ว อาจมีธาตุอื่น ผสมอยู่เสมอ ๆ เช่น ธาตุฟอสฟอรัส กำมะถัน แมงกานีส และซิลิกอน ในปริมาณที่ไม่เกินข้อกำหนดให้มีได้ (ไฟลีน ถูกขจัดด้วยวิธี) ธาตุพวกนี้มีอยู่ในเหล็กถลุง (pig iron) ที่ได้จากการถลุงแร่เหล็กและจะคงอยู่เสมอ เมื่อนำเหล็กถลุงมาทำให้สะอาดขึ้นเป็นเหล็กกล้า โดยการกำจัดมลทินต่าง ๆ เหล็กกล้ามีมากมายหลายชนิดที่มีส่วนผสมต่าง ๆ กัน โดยยึดถือหลักที่ว่าในเหล็กที่มีคาร์บอนผสมอยู่ต่ำกว่าช่วง 1.7 – 2% จัดว่าเป็นเหล็กหล่อ โดยทั่วไปเหล็กกล้าจะแบ่ง ออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม

2.2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel)

เหล็กกล้าคาร์บอน เป็นเหล็กที่มีธาตุคาร์บอนเป็นส่วนผสมหลัก อาจมีธาตุอื่น ๆ ผสมและเจือปนอยู่เล็กน้อยไม่เจาะจงผสมลงไป แต่อาจมีติดมาจากการรวมวิธีการถลุง หรือกรรมวิธีการไล่แก๊ส สามารถแบ่งเหล็กกล้าคาร์บอนได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) มีคาร์บอนไม่เกิน 0.2 % เป็นเหล็กที่มีความอ่อนและมีความแข็งแรงต่ำ นำไปรีดหรือตีเป็นแผ่นได้ง่าย มีอีกชื่อว่าเหล็กละมุน (Mild steel)

2. เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium carbon steel) มีคาร์บอนผสมตั้งแต่ 0.2 - 0.5 % มีความแข็งและความแข็งแรงมากกว่าประเภทแรก ใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกลทั่วไป สามารถนำมาอบชุบได้

3. เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High carbon steel) มีคาร์บอนผสมตั้งแต่ 0.5 % เป็นต้นไป มีความแข็งและความแข็งแรงสูง สามารถทำการอบชุบให้มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงได้ ใช้ทำเครื่องมือเครื่องใช้ต่าง ๆ ที่ต้องการสมบัติความต้านทานการสึกหรอ

2.2.2 เหล็กกล้าผสม (Alloy steel)

เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่เช่น โครเมียม โมลิบดีนัม นิกเกิล วานาเดียม และโคบอลต์ สำหรับเหล็กกล้าที่มีปริมาณแมงกานีสหรือซิลิกอนสูงกว่า 1 % ถูกจัดว่าเป็นเหล็กกล้าผสมเช่นกัน การเติมธาตุผสมอย่างระมัดระวังทำให้เหล็กมีราคาสูงขึ้นตามแต่คุณภาพ การควบคุมกระบวนการ เหล็กกล้าผสมแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ เหล็กกล้าผสมต่ำ ซึ่งมีปริมาณธาตุผสมมากไม่เกิน 10 % และเหล็กกล้าผสมสูงซึ่งมีธาตุผสมมากกว่า 10% จุดประสงค์ของการผสมสารเจือลงในเหล็กมีหลายประการ คือ

- เพิ่มคุณสมบัติด้านชุบแข็ง
- ปรับปรุงความแข็งแรงที่อุณหภูมิปกติ และที่อุณหภูมิสูง
- เพิ่มคุณสมบัติต้านทานการสึกหรอ อันเนื่องมาจากการเสียดสีขณะใช้งาน
- เพิ่มความเหนียวทนต่อแรงกระแทก
- เพิ่มคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อน
- ปรับปรุงคุณสมบัติด้านแม่เหล็ก

ธาตุที่ผสมในเหล็กมีมากมายหลายธาตุ ซึ่งแต่ละธาตุจะให้ผลต่อเหล็กแตกต่างกัน ในการศึกษาบทบาทของธาตุเหล่านี้ สามารถแยกออกเป็นกลุ่มเพื่อความสะดวก ดังเช่น กลุ่มเพิ่มเสถียรภาพของออสเทนไนต์, กลุ่มเพิ่มเสถียรภาพเฟอร์ไรต์, กลุ่มรวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ และรวมตัวกับไนโตรเจนให้ไนไตรด์ ธาตุบางตัวอาจจะให้บทบาทอยู่ได้หลายกลุ่ม

กลุ่มเพิ่มเสถียรภาพออสเทนไนต์ ได้แก่ ธาตุนิเกิล, แมงกานีส และคาร์บอน จัดเป็นธาตุที่สำคัญในกลุ่มนี้ เมื่อผสมอยู่ในเหล็กจะมีบทบาทขยายอาณาเขตของออสเทนไนต์ (จาก Phase equilibrium diagram) โดยลดอุณหภูมิของเส้น A_3 ให้ต่ำลง และเพิ่มอุณหภูมิของเส้น A_1 ให้สูงขึ้น เมื่อปริมาณของธาตุเหล่านี้เพิ่มมากขึ้น เหล็กผสมอาจจะมีการสร้างออสเทนไนต์ที่อุณหภูมิปกติ ถ้าปริมาณของธาตุที่ผสมมีมากพอธาตุในกลุ่มนี้จะมีระบบผลึกเป็น Face centered cubic ซึ่งละลายได้ดีในออสเทนไนต์

กลุ่มเพิ่มเสถียรภาพเฟอร์ไรท์ ธาตุที่สำคัญได้แก่ โครเมียม, ซิลิกอน, โมลิบดีนัม, ทังสเตน และอลูมิเนียม บทบาทของธาตุในกลุ่มนี้จะลดอุณหภูมิของเส้น A_4 แต่จะเพิ่มอุณหภูมิของเส้น A_3 ให้สูงขึ้น ทำให้อาณาเขตของเฟอร์ไรท์ กว้างขึ้นไปทางด้านอุณหภูมิสูง ธาตุในกลุ่มนี้จะมีระบบผลึกเป็น Body centered cubic ซึ่งละลายได้ดีในเฟอร์ไรท์

กลุ่มรวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ ได้แก่ ธาตุโครเมียม, ทังสเตน, โมลิบดีนัม, วาเนเดียม และนิโอเบียม ซึ่งก็มีธาตุหลายธาตุที่อยู่ในกลุ่มเพิ่มเสถียรภาพเฟอร์ไรท์ ธาตุดังกล่าวเมื่อผสมในเหล็กที่มีคาร์บอนจะเกิดการรวมตัวให้คาร์ไบด์ในลักษณะต่าง ๆ ซึ่งทำให้คุณสมบัติของเหล็กแตกต่างกันออกไป

กลุ่มรวมตัวกับไนโตรเจนให้ไนไตรด์ ธาตุที่สำคัญได้แก่อลูมิเนียม, ไทเทเนียม และโครเมียม นอกจากธาตุทั้งสามแล้ว ธาตุทุกตัวที่อยู่ในกลุ่มรวมตัวกับคาร์บอน สามารถรวมตัวกับไนโตรเจนให้ไนไตรด์ได้ แต่ให้ผลทางด้านความแข็งไม่อยู่ในเกณฑ์สูง

2.2.2.1 ชนิดของเหล็กกล้าผสม (Classification of alloy steels)

ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าผสมโดยทั่วไปจะไม่ผสมธาตุผสมเพียงธาตุใดธาตุหนึ่งโดยเฉพาะ มักจะผสมร่วมกันตั้งแต่สองธาตุขึ้นไป ทั้งนี้เพื่อให้บทบาทของธาตุที่ผสมร่วมกันได้มีส่วนทำให้คุณภาพของเหล็กกล้าผสมอยู่ในเกณฑ์สูงและราคาไม่แพงจนเกินไป ดังตัวอย่างเช่น เหล็กนิเกิล-โครเมียม, เหล็ก - โมลิบดีนัม หรือเหล็กโครเมียม - โมลิบดีนัม - วาเนเดียม เป็นต้น ทำให้การจำแนกชนิดของเหล็กกล้าผสมเป็นไปอย่างกว้างขวาง และมาตรฐานจะแตกต่างกันไปแต่ละแหล่งผลิต มีทั้งการจำแนกโดยอาศัยลักษณะโครงสร้าง เช่น

เหล็กเฟอร์ริติก เป็นเหล็กที่มีคาร์บอนต่ำ และผสมธาตุส่วนใหญ่ที่มีบทบาททำให้เฟอร์ไรท์มีเสถียรภาพ เช่น โครเมียม, โมลิบดีนัม และวาเนเดียม

เหล็กเพิร์ลิติก เป็นเหล็กที่มีคาร์บอนปานกลาง ถึงคาร์บอนสูง และมีธาตุต่าง ๆ ผสมอยู่ไม่เกิน 5-6 %

เหล็กมาร์เทนซิติก เป็นเหล็กที่มีคาร์บอนปานกลางถึงคาร์บอนสูง มีธาตุโดยเฉพาะ แมงกานีส, นิเกิล และอื่น ๆ อยู่ในปริมาณที่จะทำให้เหล็กมีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ เพียงปล่อยให้เย็นในอากาศ

เหล็กออสเทนนิติก เป็นเหล็กที่ผสมธาตุนิเกิล และแมงกานีสในปริมาณสูง ตั้งแต่ 0.1% ขึ้นไปจนถึง 30 % ซึ่งธาตุทั้งสองสามารถคงสภาพโครงสร้างเป็นออสเทนไนท์ได้ที่อุณหภูมิปกติ

นอกจากการแบ่งประเภทโดยอาศัยโครงสร้างแล้ว ยังมีการจำแนกประเภทโดยอาศัยลักษณะการใช้งานดังเช่น เหล็กสร้างเครื่องมือกล (Constructional alloy steels) ได้แก่ เหล็กกล้าที่มีคาร์บอนปานกลาง และมีธาตุผสมอยู่ในปริมาณต่ำ มีความแข็งแรงไม่สูงมาก สามารถเปลี่ยนแปลง

คุณสมบัติได้ด้วยการอบชุบ เหล็กที่กล่าวถึงนี้มีหลายชนิดขึ้นอยู่กับมาตรฐานการผลิตและปริมาณธาตุที่ผสม ที่ควรรู้จักเพราะใช้กันอย่างกว้างขวางได้แก่ เหล็กตามมาตรฐาน AISI 4140 หรือ AISI 4150 (JIS ScM 440-445 หรือ DIN 42 CrMo 4) และ AISI 4340 (JIS SncM 439;

DIN 26 Cr Ni Mo 4)

- เหล็กเครื่องมือ (Tool Steels) หมายถึงเหล็กที่ใช้ทำอุปกรณ์การตัดโลหะหรือการขึ้นรูปโลหะและอื่น ๆ ซึ่ง สามารถจำแนกออกไปได้กว้างขวางตามลักษณะการใช้งาน เช่น เหล็กทำเครื่องมือร้อน (Hot working tool) หรือเหล็กทำเครื่องมือเย็น (Cold working tool) เหล็กทำเครื่องมือทนแรงกระแทก (Shock-resistance) และเหล็กทำเครื่องมือตัดความเร็วสูง (High speed steel)

- อาศัยปริมาณของธาตุผสมเป็นหลักในการจำแนก ได้แก่ เหล็กเครื่องมือคาร์บอน (Carbon tool steels) เหล็กเครื่องมือผสมต่ำ (low-alloy tool steels) และเหล็กเครื่องมือผสมปานกลาง (Medium-alloy tool steels)

- อาศัยลักษณะการชุบแข็งเป็นหลักในการแบ่งชนิดเหล็ก ได้แก่ เหล็กชุบแข็งด้วยน้ำใช้สัญลักษณ์ W เหล็กชุบแข็งด้วยน้ำมันใช้สัญลักษณ์ O และ A แทนเหล็กชุบแข็งโดยการปล่อยให้เย็นในอากาศ สมาคม AISI (American Iron & Steel Institute) ได้จัดกลุ่มของเหล็กตามลักษณะการชุบแข็ง และการใช้งาน

2.3 บทบาทของธาตุที่มีผลต่อการชุบแข็ง

ในการชุบแข็งเหล็กผสมมีสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาสองประการดังนี้คือ

1. ความแข็งภายหลังการชุบแข็ง ผลจากการทดลองวัดความแข็งภายหลังการชุบแข็งเหล็ก 0.02% C 10% Cr ได้ความแข็ง 35 H_{rc} แต่เหล็ก 0.35% C ไม่ผสมโครเมียม ภายหลังการชุบแข็งได้ความแข็ง 50 H_{rc} จะเห็นได้ชัดว่า ธาตุผสมในเหล็กไม่มีบทบาทมากนักในการเพิ่มความแข็งให้กับ มาร์เทนไซต์ ธาตุคาร์บอนจะให้ผลต่อความแข็งของมาร์เทนไซต์เด่นชัดกว่าธาตุผสม ทั้งนี้เพราะคาร์บอนจะก่อให้เกิดการบิดเบี้ยวของกลุ่มอะตอม (Lattice deformation) ได้ดีกว่าธาตุผสม

ธาตุผสมที่อยู่ในประเภทรวมกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ จะมีผลต่อความแข็งอยู่บ้างก็เฉพาะที่เกิดคาร์ไบด์และไม่ละลายตัวในขณะที่เผาที่อุณหภูมิสูง (Non dissolved) เมื่อการจัดกระจายอยู่ในโครงสร้างของมาร์เทนไซต์จะมีบทบาททางด้านต้านทานต่อการเสียดสีในขณะใช้งาน (wear resistance) ทำให้การสึกหรอน้อยลง แต่คาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัวนี้จะไปมีผลต่อความสามารถในการชุบแข็ง ซึ่งจะกล่าวถึงในตอนต่อไป ธาตุที่สำคัญได้แก่ ทั้งสแตน, วานาเดียม และ โมลิบดีนัม ซึ่งคาร์ไบด์ของธาตุเหล่านี้มีเสถียรภาพสูงในการชุบแข็งเหล็กที่มีธาตุเหล่านี้ผสมจะต้องเผาที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1200- 1300 ° C จึงจะละลายตัว

2. ความสามารถในการชุบแข็ง (Hardenability) จากที่เคยกล่าวมาแล้ว ความสามารถในการชุบแข็งของเหล็กขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ที่สำคัญ คือ

เกรนของออสเตนไนท์ เหล็กจะมีความสามารถในการชุบแข็งสูงควรจะมีออสเตนไนท์เกรนโต เพราะบริเวณรอบเกรนของออสเตนไนท์จะเป็นบริเวณที่ช่วยให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากออสเตนไนท์ไปเป็นซีเมนไตต์และเฟอร์ไรต์ได้ดี เพราะบริเวณที่มีเสถียรภาพต่ำ กล่าวคือกลุ่มอะตอมจะเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นถ้าออสเตนไนท์มีขนาดเกรนเล็กบริเวณรอบเกรนจะมีมาก ธาตุที่ให้การไบต์ที่มีเสถียรภาพสูง เช่น วาเนเดียมคาร์ไบด์หรือทังสเตนคาร์ไบด์ จะเป็นตัวป้องกันการขยายตัวของเกรนออสเตนไนท์จึงมีผลต่อความสามารถในการชุบแข็งโดยตรง

พวกคาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัว (Non dissolved carbide) เป็นอีกแฟกเตอร์หนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการชุบแข็ง เพราะพวกคาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัวนี้จะกระจุกกระจายอยู่ในออสเตนไนท์ และพร้อมจะทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสให้กับการเปลี่ยนแปลงจากออสเตนไนท์ไปเป็นซีเมนไตต์และเฟอร์ไรต์ ในขณะที่ชุบเหล็กโอกาสที่จะให้มาร์เทนไซต์จะน้อยลงทำให้ความแข็งที่จะได้ภายหลังการชุบแข็งต่ำกว่าที่ควรจะได้

นอกจากพวกคาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัวจะมีผลต่อความสามารถในการชุบแข็งแล้ว พวกสารมลทินที่อยู่ในรูปของซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งจะไม่ละลายตัวเช่นเดียวกัน ในช่วงอุณหภูมิออสเตนไนท์จะมีผลต่อความสามารถในการชุบแข็งเช่นเดียวกับพวกคาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัว ความสม่ำเสมอของออสเตนไนท์มีความสำคัญต่อความสามารถในการชุบแข็งเช่นเดียวกัน

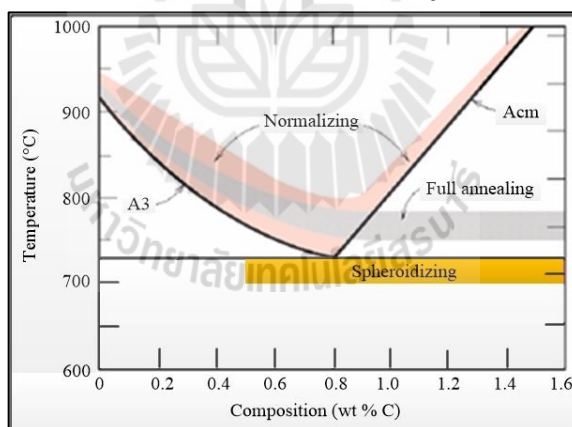
ในการชุบแข็งเหล็กจะต้องถูกเผาให้ร้อนจนได้โครงสร้างออสเตนไนท์อย่างสม่ำเสมอ ถ้าออสเตนไนท์ขาดความสม่ำเสมอ เป็นต้นว่า มีคาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัวจับตัวกันอยู่เป็นกลุ่มเป็นก้อน จะทำให้บริเวณใกล้เคียงมีปริมาณของธาตุผสมแตกต่างกันไปจากบริเวณอื่น ๆ เพราะการเคลื่อนไหวของธาตุผสมโดยทั่วไปจะช้า ยิ่งบริเวณที่มีผลึกของคาร์ไบด์ขนาดโตการเคลื่อนที่ของอะตอมของธาตุผสมจะต้องเคลื่อนที่เป็นระยะทางไกล ซึ่งต้องใช้เวลามากขึ้น ดังนั้น ธาตุผสมในโครงสร้างของออสเตนไนท์จะไม่สม่ำเสมอ และการขยายตัวของเกรนออสเตนไนท์จะไม่เท่ากันตลอด เพราะการขยายตัวของออสเตนไนท์จะเกิดขึ้นเมื่อคาร์ไบด์ละลายตัวหมดแล้ว ดังนั้นบริเวณใดที่ไม่มีคาร์ไบด์เกรนของออสเตนไนท์จะขยายตัวได้เร็วกว่าบริเวณที่มีคาร์ไบด์ จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ขนาดของเกรนออสเตนไนท์ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งทำให้มาร์เทนไซต์ที่ได้ ภายหลังการชุบแข็งไม่สม่ำเสมอเช่นเดียวกัน ซึ่งจัดเป็นคุณสมบัติที่ไม่ดีของเหล็กชุบแข็ง

2.4 การอบปกติเพื่อปรับปรุงสมบัติของเหล็ก (Normalizing)

กรรมวิธีการขึ้นรูปเหล็กโดยทั่วไปเป็นกระบวนการทำให้เสียรูป ไม่ว่าจะเป็นการรีดร้อน (Hot rolling) การตีขึ้นรูปร้อน (Hot forging) การขึ้นรูปในลักษณะนี้เป็นการทำให้เหล็กมีอุณหภูมิสูงส่งผลให้ได้ขนาดเกรนโต มีสมบัติเชิงกลไม่ดีคือทนแรงดึงหรือแรงกระแทกได้น้อยลง งานที่ผ่านการหล่อก็เช่นเดียวกันจะมีขนาดเกรนโตลักษณะเป็น โครงสร้างตาข่าย (Dendrite) ไม่สม่ำเสมอ และงานที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นเช่นการรีดเย็น (Cold rolling) การตีขึ้นรูปเย็น (Cold forging) ทำให้โครงสร้างภายในบิดเบี้ยวไปตามทิศทางของแรงกระทำ เกิดความเค้นภายในชิ้นงาน ส่งผลให้สูญเสียความเหนียวและมีความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างไม่สม่ำเสมอ ลักษณะที่ไม่ดีเหล่านี้สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ด้วยกรรมวิธีการอบปกติเพื่อให้เกรนมีขนาดเล็กลงและสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.1

วัตถุประสงค์ที่สำคัญของการอบปกติ คือ

1. เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น
2. เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านกลึง ไส หรือตัด
3. ปรับปรุงสมบัติด้านความเหนียว
4. ปรับปรุงโครงสร้างให้สม่ำเสมอเหมาะแก่การชุบแข็งในขั้นต่อไป
5. ทำลายความเค้นภายในที่เกิดจากการขึ้นรูปเย็น



รูปที่ 2.1 แผนภูมิการอบปกติ

จากรูปที่ 2.1 การทำอบปกติใช้วิธีเผาเหล็กให้ร้อนจนมีอุณหภูมิสูงอยู่ในช่วงออสเทนไนต์เหล็กที่มีคาร์บอนต่ำกว่า 0.8 % (Hypo eutectoid) จะเผาให้มีอุณหภูมิเหนือเส้น A_3 และเหล็กที่มีคาร์บอนสูงกว่า 0.8 % (Hyper eutectoid) จะเผาอุณหภูมิเหนือเส้น ประมาณ 30-50 °C ทั้งไว้ที่อุณหภูมินี้ประมาณ 30-60 นาทีต่อความหนาเฉลี่ย 25 mm เช่นเดียวกับการอบอ่อนจากนั้นจะนำเหล็กออกจากเตาปล่อยให้เย็นในอากาศนิ่งอัตราการเย็นตัวประมาณ 1-5 °C ต่อวินาทีถ้าเป็นการเป่า

อากาศอัตราการเย็นตัวจะเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 10°C ต่อวินาที (การอบอุ่นอัตราการเย็นตัวประมาณ $5-10^{\circ}\text{C}$ ต่อวินาที) อัตราการเย็นตัวที่เร็วขึ้นจะมีผลต่อโครงสร้างที่เกิดขึ้นกล่าวคืออัตราการเย็นตัวยิ่งเร็วการเปลี่ยนแปลงจากออสเตนไนท์จะเกิดที่อุณหภูมิยิ่งต่ำลงจุดยูเทคตอยด์ของเหล็กจะเปลี่ยนแปลงมาทางด้านคาร์บอนต่ำลงสำหรับไฮโปยูเทคตอยด์และจะย้ายไปทางด้านที่มีคาร์บอนมากขึ้นสำหรับเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ทำให้ปริมาณของเฟอไรต์เพิ่มมากขึ้นและความละเอียดของเฟอไรต์จะยิ่งดีขึ้น (เปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิต่ำ) ความละเอียดของเฟอไรต์หมายถึงแถบบาง ๆ ระหว่างเฟอไรต์และซีเมนไทต์จะแคบมากนอกจากนี้โปรยูเทคตอยด์เฟอไรต์ในเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์จะมีปริมาณน้อยลงเช่นเดียวกันโปรยูเทคตอยด์ซีเมนไทต์ในเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์จะน้อยลงและลักษณะการต่อเนื่องตามขอบเกรนจะลดน้อยลงคุณสมบัติของโครงสร้างที่ประกอบด้วยเฟอไรต์มีความละเอียดเช่นนี้จะทำให้เหล็กมีความแข็งแรงและความแข็งสูงกว่าเหล็กที่ผ่านการอบอุ่นจากที่กล่าวมาแล้วว่าการทำอบปกติเป็นการปรับปรุงโครงสร้างให้สม่ำเสมอเพื่อที่จะนำไปทำการชุบแข็งในภายหลังนั่นทั้งนี้ก็เพื่อให้เหล็กภายหลังจากการชุบแข็งมีคุณสมบัติที่ดีหลีกเลี่ยงข้อเสียที่จะเกิดขึ้นปกติเหล็กยังมีเกรนละเอียดย่อมเป็นผลดีต่อการชุบแข็งมากเพราะเหล็กมีเกรนหยาบและไม่สม่ำเสมอภายหลังการชุบแข็งเหล็กจะมีความแข็งไม่สม่ำเสมอเช่นเดียวกันและบางที่อาจจะเกิดการบิดหรือแตกร้าวได้ยังเป็นเหล็กที่มีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่และปริมาณของธาตุที่ผสมขาดความสม่ำเสมอการชุบแข็งอาจจะไม่ประสบผลดีตามที่ต้องการดังนั้นในกรณีที่ต้องการคุณภาพของเหล็กจากการชุบแข็งสูงจึงสมควรทำการอบปกติเสียขึ้นหนึ่งก่อนแล้วจึงนำไปทำการชุบแข็ง

2.5 การชุบแข็งผิว (Surface hardening)

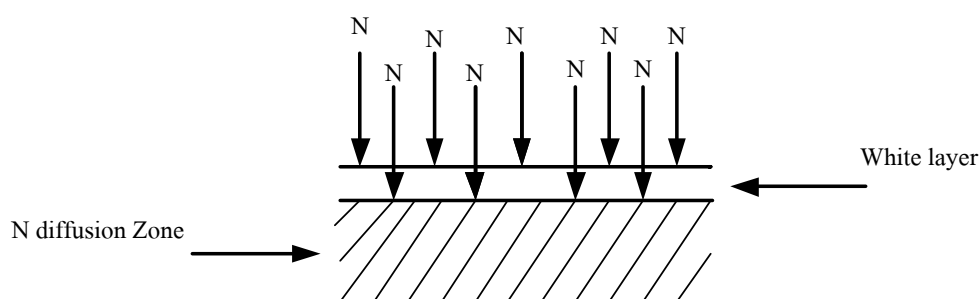
การชุบแข็งพื้นผิวเป็นการชุบแข็งเพื่อให้ได้ค่าความแข็งเฉพาะตามบริเวณผิวเท่านั้นส่วนเนื้อเหล็กภายในผิวแข็งจนถึงใจกลางยังคงเป็นเนื้อเหล็กเดิมซึ่งมีความเหนียวสูง (มันส์ สติริจินดา, 2540) มุ่งหมายเพื่อต้องการให้เหล็กทนต่อการสึกหรอในขณะที่ใช้งาน ทนต่อแรงบิดหรือแรงกระแทกอย่างรุนแรงได้ดีโดยไม่แตกหัก เป็นกรรมวิธีชุบแข็งเหล็กที่มีส่วนดีกว่าการชุบแข็งตามที่ได้กล่าวมาแล้ว เพราะการชุบแข็งโดยวิธีที่กล่าวมาแม้จะได้ความแข็งที่ผิวสูงก็ตามแต่จะสูญเสียความเหนียวของเหล็ก การทำเทมเปอร์จะช่วยเพิ่มความเหนียวได้บ้าง แต่กลับจะต้องสูญเสียความแข็งไปบ้าง ยกเว้นเหล็กผสมสูงบางชนิด ที่ทำให้ได้คุณภาพทั้งความเหนียวและความแข็ง แต่ส่วนใหญ่ก็มีราคาแพง ดังนั้นจะเห็นว่าการชุบแข็งพื้นผิวนับเป็นกรรมวิธีชุบแข็งที่น่าสนใจมากในด้านของความประหยัด และได้ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่มีคุณภาพดีพร้อมทั้งความแข็งผิวและความเหนียว ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่นิยมทำการชุบแข็งผิว ได้แก่ พวกเพลลาข้อเหวี่ยง เพลาาราวลิ้น เฟืองเกียร์ และอื่น ๆ การชุบแข็งพื้นผิวกระทำได้หลาย ๆ วิธี ดังต่อไปนี้

2.5.1 การชุบแข็งผิวโดยกรรมวิธีซอฟต์แวร์ไนตรายดิง (Soft-nitriding)

กระบวนการซอฟต์แวร์ไนตรายดิง ดำเนินการที่อุณหภูมิ (520-570 °C) ทำให้เกิดชั้นผิวของสารประกอบไนโตรเจน ($Fe_xC_yN_z$) ชั้นผิวของสารประกอบนี้เกิดสนิมยากและทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี มีคุณสมบัติทนทานต่อการเสียดสี เนื่องจากชั้นผิวสารประกอบทนทานต่อการกัดกร่อน ทำให้เห็น โครงสร้างเป็นแถบสีขาวที่บริเวณผิวของชิ้นงานทดสอบ ในขณะที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างชั้นผิวขาวนี้จึงถูกเรียกว่าชั้นผิวขาว (White layer) ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบความแข็งของชั้นผิวขาวนี้กับความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านขบวนการคาร์บูไรซิง คาร์บอนไนตรายดิง ไนตรายดิง ชั้นผิวขาวมีความแข็งต่ำกว่าเล็กน้อย ดังนั้นจึงเรียกขบวนการนี้ว่าซอฟต์แวร์ไนตรายดิง อีกทั้งอุณหภูมิที่ใช้ต่ำ (520-570 °C) เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการคาร์บูไรซิงหรือคาร์บอนไนตรายดิง จึงถูกเรียกว่า “Low Temperature Carbonitriding” โดยปกติชั้นสารประกอบ จะมีความแข็งดังต่อไปนี้

1. Carbonsteel Hv 450~650
2. Alloy steel (SCr, SCM) Hv 600~800
3. สารประกอบ Fe_3N , $\gamma-Fe_4N$: CrN, Cr_2N , AlN, MoN, Mo_2N , Cr-N, Al-N เป็นต้น จะมีความแข็งที่สูงกว่าทั้ง 2 ชนิด

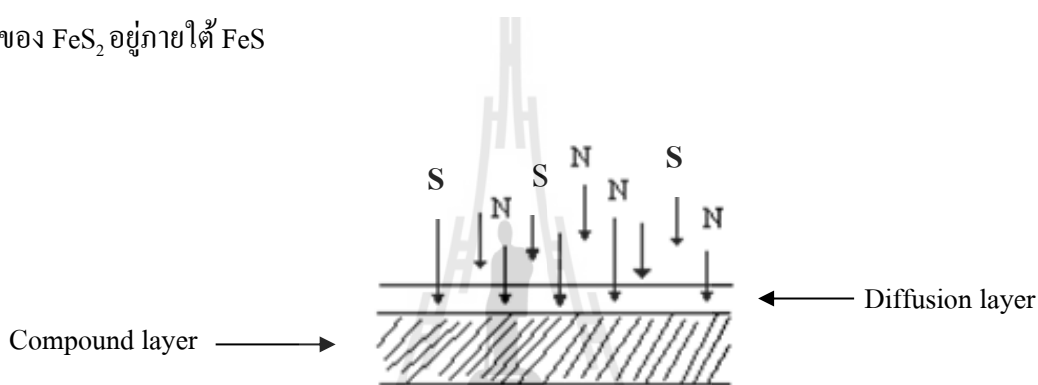
กลไกการเกิดชั้นผิวแข็ง (White layer or Compound layer) เกิดเป็น 2 ชั้น ได้แก่ ชั้นสารประกอบ (White layer) และชั้นการแพร่ (Diffusion zone) การแพร่จากธาตุไนโตรเจนและคาร์บอนไม่ได้ทำปฏิกิริยากับเหล็ก จึงเกิดการละลายในลักษณะ สารละลายของแข็ง (Solid Solubility) ช่วยเพิ่มคุณสมบัติต้านทานการล้า (Fatigue resistance) ส่วนชั้นผิวแข็ง (White layer) เกิดจากการทำปฏิกิริยากับเหล็กเกิดสารประกอบ (Fe_2N , Fe_4N) ช่วยเพิ่มคุณสมบัติต้านทานการสึกหรอ



รูปที่ 2.2 แบบจำลองกรรมวิธีแก๊สซอฟต์แวร์ไนตรายดิง

2.5.2 การชุบแข็งผิวโดยกรรมวิธีซัลเฟอร์ไนตรายดิง (Sulfur-nitriding)

กระบวนการซัลเฟอร์ไนตรายดิง เป็นกระบวนการใหม่ วิธีการคล้ายกับกระบวนการซอพต์ไนตรายดิงทำที่อุณหภูมิต่ำ (520-570 °C) ในกระบวนการนี้มีสารตั้งต้นเป็นแอมโมเนียและไฮโดรเจนซัลไฟด์ ทำให้เกิดชั้นผิวของสารประกอบไนโตรเจนและซัลเฟอร์กับเหล็ก ($Fe_xS_yN_z$) เป็นชั้นสารประกอบซัลไฟด์เช่นเดียวกับการเกิดชั้นผิวขาว ในกระบวนการแก๊สซอพต์ไนตรายดิง ซึ่งมีคุณสมบัติทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน, ด้านทานการกัดกร่อน และความต้านทานการสึกหรอดีขึ้น เกิดชั้นสารประกอบ FeS และ FeS_2 สารประกอบทั้งสองนี้ช่วยในเรื่องการต้านทานแรงในการเคลื่อนที่ และเป็นโครงสร้างของสารหล่อลื่นในตัวมันเอง โดยที่ชั้นของ FeS_2 อยู่ภายใต้ FeS



รูปที่ 2.3 แบบจำลองกรรมวิธีแก๊สซัลเฟอร์ไนตรายดิง

2.6 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction Coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน คือ แรงที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวสัมผัสของวัตถุ 2 ชนิด ที่มีทิศที่ขนานกันและเมื่อมีการสัมผัสที่ผิวจะเกิดการต้านทานการลื่นไถลของวัตถุชนิดนั้น ซึ่งอ้างอิงถึงแรงของแรงต้านทาน มีกฎที่ใช้ในการพิจารณา 3 ข้อดังนี้

1) ความเสียดทาน เกิดจากน้ำหนัก หรือแรงในแนวตั้งฉากที่กระทำกับพื้นสัมผัส และมี ส่วนจากการเกิดสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (μ)

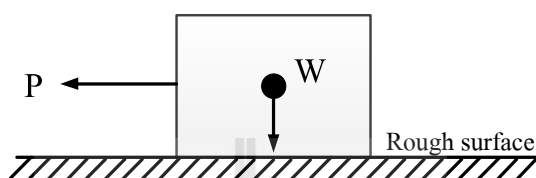
2) ความเสียดทาน ไม่ขึ้นอยู่กับหรือเป็นอิสระจากพื้นผิวสัมผัส

3) ความเสียดทาน ไม่ขึ้นกับความเร็วในการลื่นไถล

ผู้ที่ได้รับการยกย่องว่าเป็นบุคคลแรกที่ค้นพบเรื่องความเสียดทาน คือ Leonardo Davinci หลังจากนั้น Amonton ได้ทำการสังเกตและตั้งกฎพื้นฐานของความเสียดทานไว้ 2 ข้อ ซึ่งได้รับการกล่าวถึงและมีการนำไปอ้างอิงเป็นที่แพร่หลาย และกฎข้อที่ 3 ได้ตั้งขึ้นจากการสังเกตของ Coulomb ซึ่งมีเนื้อหาดังที่กล่าวเบื้องต้น

2.6.1 แรงเสียดทานชนิดแห้ง (Dry Friction)

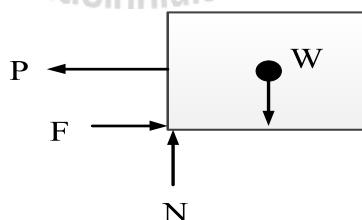
การเกิดแรงเสียดทานชนิดแห้งบนผิวสัมผัสเกิดขึ้นเมื่อผิวสัมผัสของของแข็งสองพื้นผิวสัมผัสกันโดยไม่มีของไหลคั่นระหว่างหน้าสัมผัสนั้น ๆ จะอธิบายปรากฏการณ์ของแรงเสียดทานได้จากการพิจารณามวล ซึ่งมีแรงเนื่องจากน้ำหนักตัวคือ W นิวตันกระทำอยู่ มวลวางอยู่บนพื้นหยาบ โดยมีแรงดึง P นิวตันดึงไปทางซ้ายดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงมวลที่มีแรงดัน P ดึง ไปบนพื้นหยาบ

แรง N คือแรงปฏิกิริยาที่พื้น และแรง F คือแรงเสียดทาน ดังนั้นแรงเสียดทานจะเกิดจากการขัดตัวกันของร่องเล็ก ๆ จำนวนมากที่อยู่บนผิวสัมผัสทั้งสอง ดังนั้นบนผิวเรียบลื่นซึ่งไม่มีร่องเล็ก ๆ อยู่จะไม่มีแรงเสียดทาน

และพบว่ามีความเหตุเกิดขึ้นได้ 2 อย่าง ในขณะที่ออกแรง P ดึงมวลก้อนนี้ นั่นคือ การที่มวลก้อนนี้จะเกิดการล้มลง เหตุการณ์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อแรงเสียดทานมีค่ามาก และแรง P ที่ดึงมวลก้อนนี้มีค่ามากพร้อมทั้งกระทำในตำแหน่งที่ทำให้แรง N เลื่อนมาอยู่ที่ขอบของมวล ดังรูปที่ 2.5 หากเกิดลักษณะดังรูปที่ 2.5 แล้ว มวลก็จะเริ่มล้มลงแทนที่จะเกิดการลื่นไถล (slip) ไปตามแนวแรง P



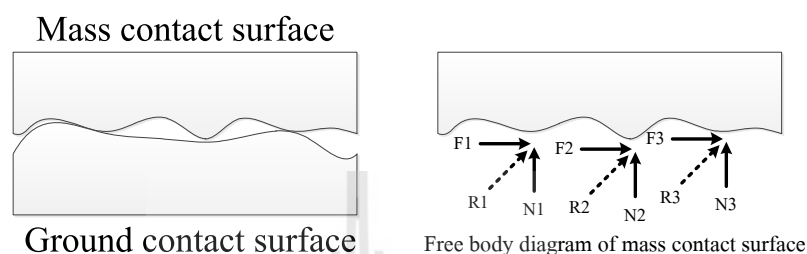
รูปที่ 2.5 แสดงตำแหน่งของแรง N ก่อนที่มวลจะล้มลง

การที่มวลก้อนนี้จะเกิดการลื่นไถล ในกรณีที่แรง P อยู่ในตำแหน่งที่ต่ำใกล้พื้นหยาบเพียงพอ และพื้นผิวสัมผัสมีแรงเสียดทานไม่มากพอ เมื่อแรง P มีค่ามากจนถึงจุด ๆ หนึ่งก็จะเกิดการเคลื่อนที่ในลักษณะของการไถล (Slip) ไปตามพื้นหยาบแรงเสียดทานที่ต้านแรง P ที่เกิดขึ้นก่อนมวลจะลื่นไถลเรียกว่า แรงเสียดทานสถิตย์ (Static Friction) จากการทดลองในของปฏิบัติการ

หลาย ๆ ครั้ง พบว่า แรงเสียดทานสถิตย์สูงสุด (F_s) จะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับแรงปฏิกิริยาที่พื้น (N) หรือ

$$F_s = \mu_s N \quad (2.1)$$

โดยที่ μ_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Static friction coefficient) และแรงเสียดทานสถิตย์สูงสุดนี้จะเกิดขณะที่มวลเริ่มลื่นไถล



รูปที่ 2.6 แสดงส่วนขยายของพื้นผิวสัมผัสระหว่างมวลกับพื้นหยาบ

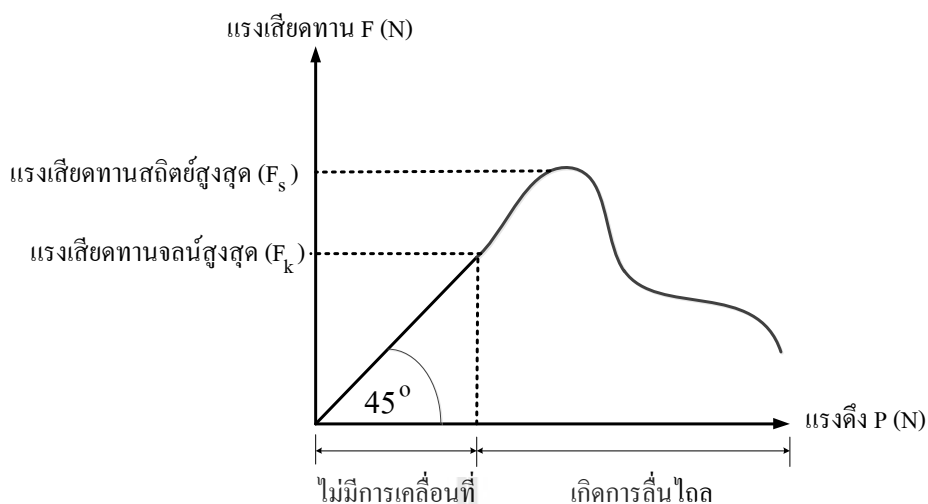
เมื่อมวลเริ่มไถลไปแล้ว ร่องเล็ก ๆ บนผิวสัมผัสทั้งสองในรูปที่ 2.6 จะเริ่มสัมผัสกันน้อยลงเพราะว่าแรง P ดึงทำให้มวลเคลื่อนที่ ทำให้มีเพียงส่วน “ยอด” ของร่องเล็ก ๆ เท่านั้นที่สัมผัสกัน แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในช่วงนี้จะเกิดจาก “แรงยึด” (Adhesion Force) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการติดกันของจุดสัมผัสที่มีอุณหภูมิสูงจากการขัดถูในระหว่างที่เคลื่อนที่ผ่านกันของร่องเล็ก ๆ บนผิวสัมผัส

แรง P จะทำให้จุดที่ติดกันนี้แยกออกจากกัน ซึ่งทำให้แรงยึดหายไป แต่จะก่อให้เกิดจุดยึดติดใหม่ได้อีกอันเป็นเหตุทำให้เกิดแรงเสียดทานต้านแรง P ตลอดการเคลื่อนที่ของมวล แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในขณะที่มวลเริ่มเคลื่อน ไถลนี้เรียกว่าแรงเสียดทานจลน์ (Kinetic frictional force) พบว่าแรงเสียดทานจลน์สูงสุด (F_k) มีความสัมพันธ์กับแรงปฏิกิริยาที่พื้นดังนี้

$$F_k = \mu_k N \quad (2.2)$$

โดย μ_k คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์

เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึง P และแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นโดยกำหนดให้แกนราบแทนแรงดึง P และแกนตั้งแทนแรงเสียดทาน จะได้ผลดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึง (P) และแรงเสียดทาน (F)

ซึ่งจากรูปพบว่าในช่วงที่มวลยังไม่ได้เคลื่อนที่ แรงเสียดทานสถิตย์จะมีค่าเท่ากับแรงดึง P และเมื่อเพิ่มแรงดึง P มากขึ้น แรงเสียดทานสถิตย์จะมีค่าสูงสุด (ค่านี้หาได้จากสมการ $F_s = \mu_s N$) จากนั้นจะเกิดการลื่นไถลขึ้น ทำให้แรงเสียดทานลดลงอย่างทันทีทันใด ในช่วงนี้แรงดึง P จะมีค่ามากกว่าแรงเสียดทานจลน์ (F_k) ทำให้มวลเริ่มมีความเร็วเกิดขึ้น ในช่วงแรกของการเคลื่อนที่พบว่า การเพิ่มแรงดึง P ไม่ทำให้แรงเสียดทานจลน์ (F_k) เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นแต่เมื่อแรงดึง P มีค่าเพิ่มสูงมาก ๆ จะส่งผลให้ความเร็วของมวลเพิ่มขึ้น และก่อให้เกิดผลทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics effects) ซึ่งส่งผลให้แรงเสียดทานจลน์มีค่าลดลงเมื่อแรงดึง P มีค่าสูงมาก ๆ

รูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นประเด็นที่สำคัญเกี่ยวกับแรงเสียดทานสถิตย์ว่า แรงเสียดทานสถิตย์จะมีค่าเท่ากับแรงที่พยายามทำให้วัตถุเคลื่อนที่และแรงเสียดทานสถิตย์จะมีค่าสูงสุดได้ไม่เกิดที่คำนวณได้จากสมการที่ 1 หากแรงพยายามมีค่าเกินกว่านี้วัตถุจะเกิดการลื่นไถล

2.7 การสึกหรอ

การสึกหรอเกิดจากการแยกหลุดของอนุภาคของผิวชิ้นงาน จากการเสียดสีกันของผิวงาน ระหว่างสองผิว ขณะการใช้งานทำให้ ขนาด รูปร่าง และน้ำหนักเกิดการเปลี่ยนแปลง การสึกหรอ เป็นการหลุดของผิววัสดุจากการถูแรงกระทำขณะที่ผิวเคลื่อนที่สัมผัสกับอีกผิวหนึ่ง เช่นการสึกหรอจากการไถระหว่างผิว (Sliding wear) การขัดถูของอนุภาคผิว (Abrasion) การชนของอนุภาคขนาดเล็กหรือของไหลกับผิว (Erosion) ซึ่งลักษณะกลไกการสึกหรอแตกต่างกันไปขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น โครงสร้างระดับจุลภาคผิว ชนิดของวัสดุ ลักษณะการเคลื่อนที่ของวัสดุ และลักษณะแรงที่ตกลงบนตัวอย่างทดสอบ (Nature load)

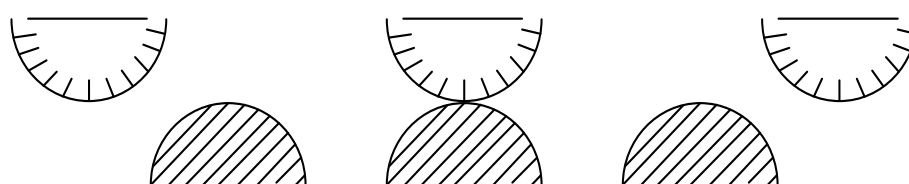
2.7.1 กลไกการสึกหรอ (Wear Mechanisms) สามารถแบ่งออกเป็น 4 ลักษณะคือ

การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear) เกิดจากการสัมผัสกันของยอดแหลมของเนื้อวัสดุ ซึ่งทำให้เกิดชั้นของเนื้อวัสดุที่เชื่อมติดเข้าด้วยกัน และขาดออกจากกัน การสึกหรอแบบนี้ มักเกิดจากการเคลื่อนที่แบบเลื่อนไถ และการหล่อลื่นไม่เพียงพอ มักเกิดเศษโลหะขึ้นระหว่างผิวสัมผัส

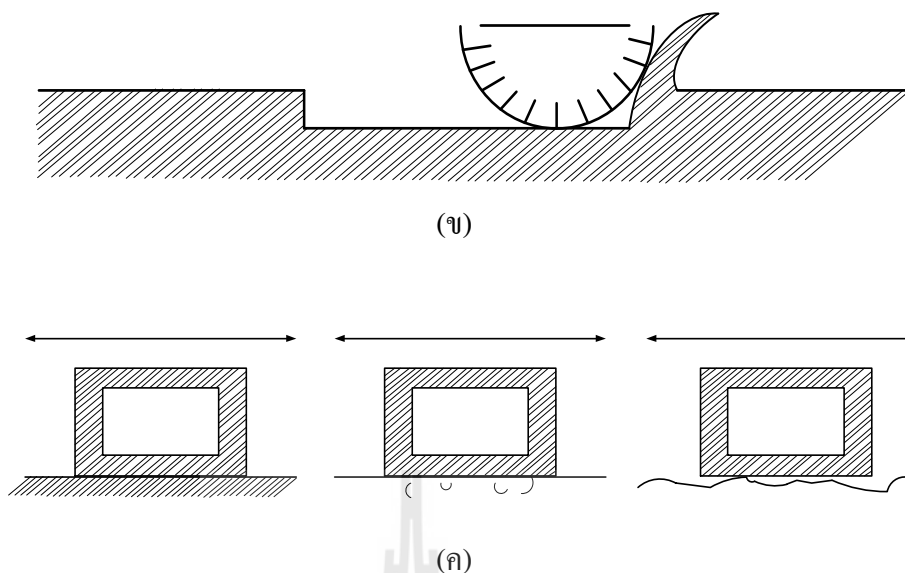
การสึกหรอแบบขูดขีด (Abrasive Wear) เกิดจากการที่เนื้อวัตถุหลุดหายไปอันเนื่องมาจากถูกขูดขีดหรือถูกขูดเป็นร่องลึก (2-body Abrasion) หรือเกิดจากการที่มีเศษผง ฝุ่น ละออง หรือเศษโลหะที่มีความแข็งมาก ๆ แทรกอยู่ระหว่างผิวสัมผัส (3-body Abrasion) ทั้งนี้การสึกหรอแบบนี้มักเป็นผลเนื่องมาจากการสึกหรอแบบยึดติดด้วย

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

การสึกหรอที่ชั้นผิวโดยปฏิกิริยาไตรโบเคมี (Surface Layer Wear by Tribochemical Reactions) เกิดจากการที่ผิวสัมผัสเกิดการขัดสีและเกิดผลพวงจากปฏิกิริยาทางเคมี โดยเฉพาะ “ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation)” บางครั้งอาจเรียกว่า การสึกหรอจากการกัดกร่อน (Corrosion wear) (Gunter Menning, 1995)



(ก)



รูปที่ 2.8 การสึกหรอแบบต่าง ๆ (ก) การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive)

(ข) การสึกหรอแบบขูดขีด (Abrasive) (ค) การสึกหรอแบบล้าตัว

(Fatigue Wear)

ลักษณะที่คุณสมบัติของวัสดุจะส่งผลกระทบต่อปฏิกริยาระหว่าง 2 ผิวหน้า ขณะที่เกิดการสึกหรอจะต่างกันไปในแต่ละกรณี ขึ้นอยู่กับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น โดยแบ่งออกง่าย ๆ ได้เป็น 3 กรณีด้วยกัน ได้แก่

การสึกหรอของเนื้อโลหะบนเนื้อโลหะ (Metal-to-metal wear หรือ Adhesive wear)

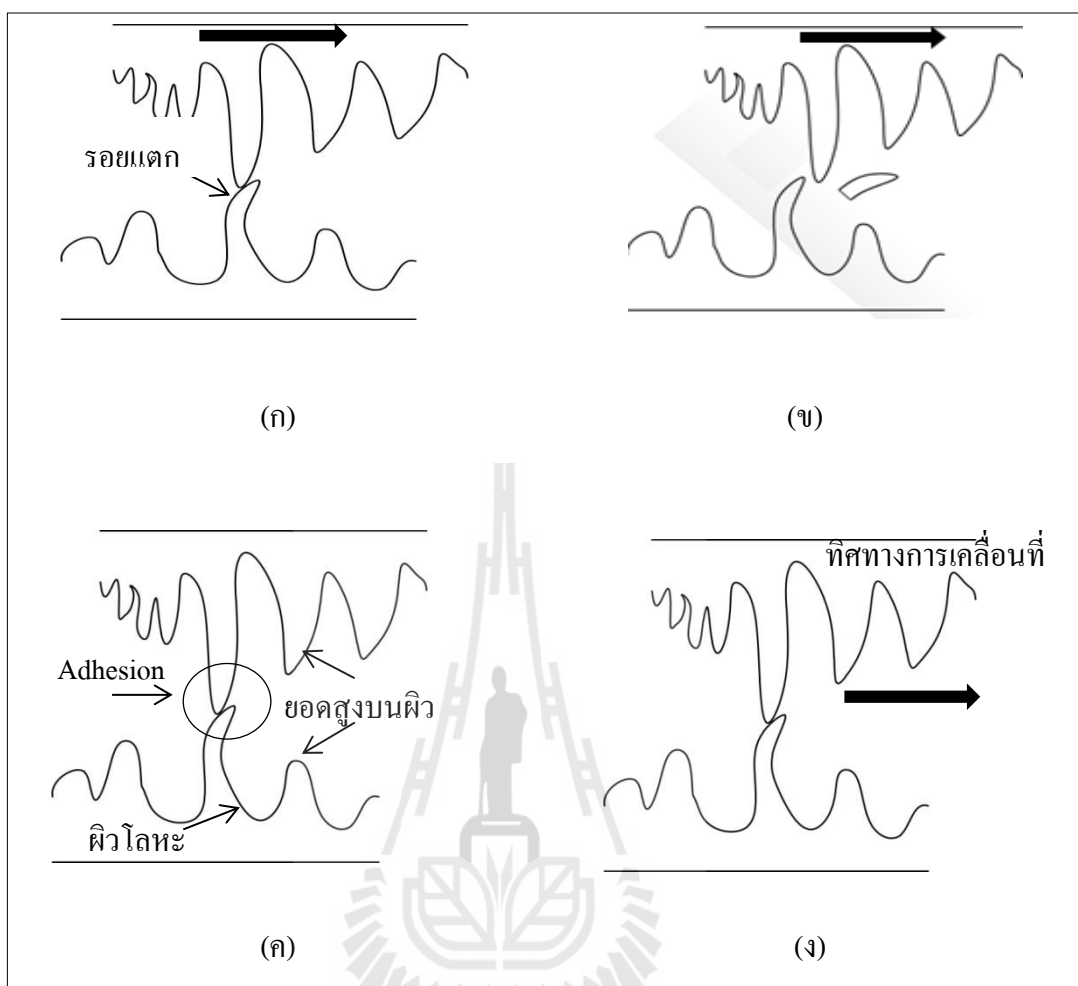
การสึกหรอจากการขูดขีด (Abrasive wear)

การสึกหรอแบบไถลในสภาวะแห้ง (Dry sliding wear)

การสึกหรอของเนื้อโลหะบนเนื้อโลหะ

2.7.2 ลักษณะของคู่ผิวสัมผัส

เมื่อผิวหน้าของโลหะ 2 ผิวหน้าเคลื่อนที่เข้ามาสัมผัสกันภายใต้แรงกด พันธะทางโลหะจะสามารถเกิดขึ้นได้ ณ บริเวณจุดสัมผัส พันธะที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ยอดสูง (Asperity) ของวัสดุมาแตะกันนี้เรียกว่าเป็นพันธะแบบแนบติด หรือ “Adhesion” ในขณะที่ผิวหน้า 2 ผิวเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างกัน พันธะแบบแนบติดจะสามารถยับและหลุดแตกออกจากกัน ถ้าหากว่าความแข็งแรงของพันธะโลหะนี้มีค่าความแข็งแรงของยอดสูงกว่าของผิวหน้าหนึ่ง ยอดสูงนั้นจะแตกและผิวหน้านั้นจะสูญเสียเนื้อวัสดุไปให้คู่ผิวสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การเสียดสี

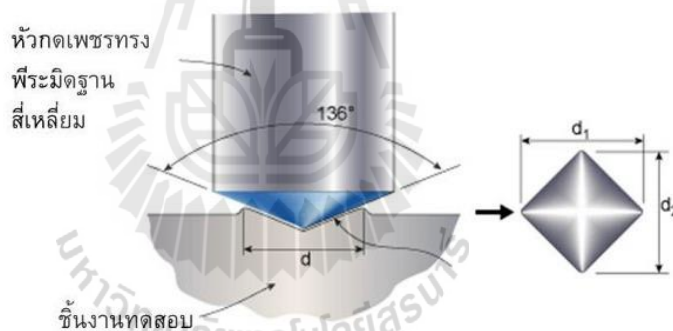
ในช่วงที่เกิดการสึกหรอ การสร้างพันธะแบบแนบติดและการแตกหักของ วัสดุค้ำที่กล่าวมา ก็จะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กันอย่างต่อเนื่อง เป็นผลให้เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุจากผิว หนึ่งไปยังอีกผิวหนึ่งตลอดเวลา ซึ่งมักจะเกิดขึ้นทั้ง 2 ทาง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าวัสดุทั้ง 2 มี โครงสร้างลักษณะคล้ายกัน หรือมีความเข้ากันได้ทางโครงสร้าง (Structural compatibility) ที่ดี เนื่องจากค่าความเสียดทานระหว่างผิววัสดุจะขึ้นกับความเข้ากันได้ นี้ ยกตัวอย่างเช่น โลหะ โครเมียมกับทองแดงมีความเข้ากันได้ทางโครงสร้างต่ำ ดังนั้น ความเสียดทานและการสึกหรอที่ เกิดขึ้นระหว่าง 2 ผิวนี้จึงมีค่าที่ต่ำด้วย ดังรูปที่ 2.9

2.8 การทดสอบคุณสมบัติของชิ้นทดสอบ

เป็นการทดสอบคุณสมบัติ ความสามารถ ชัดจำกัดของชิ้นงานที่ได้ผ่านกระบวนการมาไม่ว่าจะเป็น โครงสร้างชั้นหนาผิวแข็ง ความแข็งของชิ้นงาน

2.8.1 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers hardness)

เทคนิคนี้เป็นการพัฒนามาจากการทดสอบแบบบริเนล (Brinell) เพื่อลดปัญหาของความถูกต้องในการวัด หัวกดที่ใช้ในวิธีการนี้คือ เพชร ซึ่งมีรูปร่างเป็นพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส และมีมุมระหว่างผิวหน้าด้านตรงข้ามเท่ากับ 136 องศาที่ใช้อยู่ระหว่าง 1 กรัม-100 กิโลกรัม ใช้ระยะเวลาทดสอบประมาณ 10 -15 วินาที รอยที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กในระดับไมครอนจึงต้องอาศัยกล้องจุลทรรศน์ในการช่วยคำนวณความแข็งค่าความแข็งที่ได้จะแสดงออกมามีค่าเช่น 800 HV/10 ซึ่งหมายถึง มีค่าความแข็ง Vickers 800 และใช้แรงกด 10 กิโลกรัม ค่าความแข็งที่ได้จากวิธีการนี้จะให้ผลที่ชัดเจนและเป็นรูปแบบมากกว่าวิธีการอื่นและสามารถใช้ทดสอบวัสดุได้อย่างหลากหลายทั้งที่มีองค์ประกอบสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 2.10 แสดงการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส

2.8.2 การศึกษาโครงสร้างของโลหะ (Metallography)

การศึกษาโลหะ [1] ภายใต้กล้องขยาย (Microscope) หลักการของการศึกษาจะเริ่มต้นจากการเตรียมผิวของโลหะก่อนโดยการปรับระดับผิวให้เรียบโดยหินไฟและตามด้วยการขัดผิวให้เรียบด้วยเริ่มตั้งแต่กระดาษทรายหยาบจนถึงกระดาษทรายละเอียด ขณะขัดจะใช้ น้ำยาด่างเพื่อทำความสะอาดเศษโลหะที่ติดกับกระดาษทรายและระบายความร้อน ขั้นตอนต่อไปก็ทำการขัดละเอียดด้วยจานหมุนหุ้มผ้าสักหลาดโดยมีน้ำผสมผงขัดที่ละเอียดมาก (0.3-0.5 ไมครอน) นีลบน

ลึกลงอาจใช้ผงขัดอะลูมินาหรือโครเมียมออกไซด์ (ทรายโครเมียม) ขัดจนผิวโลหะเรียบเทียบเท่ากระจกเงาจากนั้นจึงไปผ่านการกัดผิว (Etching) บาง ๆ ด้วยสารละลายกรดเจือจางซึ่งเรียกว่า Etchants ซึ่งมีหลายสูตรขึ้นอยู่กับโลหะที่จะศึกษาโครงสร้างโดยทั่วไปถ้าเป็นเหล็กจะใช้กรดไนตริกประมาณ 2-4% ผสมแอทิลแอลกอฮอล์ ซึ่งเรียกกันว่า Nital หรือใช้กรดเกลือผสมเฟอร์ริกคลอไรด์ หรืออื่นๆ

การกัดผิวหน้าของโลหะด้วยสารละลายกรด เพื่อความมุ่งหมายให้สารละลายกรดกัดโลหะ ซึ่งโลหะจะมีความต้านทานต่อการกัดกรดต่างกัน โดยเฉพาะบริเวณขอบเกรนจะถูกกัดด้วยสารละลายกรดได้มาก เพราะเป็นบริเวณที่การเรียงตัวของอะตอมขาดความเป็นระเบียบ และมีอะตอมของสารมลทินเรียงตัวกันอยู่หนาแน่น จัดเป็นบริเวณที่ไม่มีเสถียรภาพ ภายหลังของการกัดผิวด้วยสารละลายกรดแล้ว ผิวของโลหะจะมีลักษณะสูงต่ำที่ต่างกัน ทำให้เกิดเป็นลักษณะของโครงสร้างเมื่อนำไปศึกษาภายใต้กล้องขยาย

2.8.3 เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD)

เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน หรือ เทคนิค XRD เป็นเทคนิคที่นำรังสี X มาใช้วิเคราะห์สารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง เทคนิค XRD อาศัยหลักการยิงรังสี X ที่ทราบความยาวคลื่น (λ) ไปกระทบชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่าง ๆ กัน โดยมีหัววัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากองศาในการเลี้ยวเบนรังสี X จะขึ้นกับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้น ของสารประกอบในสารตัวอย่าง อีกทั้งความหนาของชั้นฟิล์มได้อีกด้วย

2.8.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง TEM (เครื่อง SEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM นี้ไม่จำเป็นต้องที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางเท่ากับเมื่อดูด้วยเครื่อง TEM ก็ได้ เพราะ) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัด (ไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่างอิเล็กตรอนที่ ทำการสำรวจ ซึ่งภาพสะท้อนจากผิวหน้าของชิ้นงานที่ได้จากเครื่อง SEM จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาพื้นฐานและรายละเอียดของ

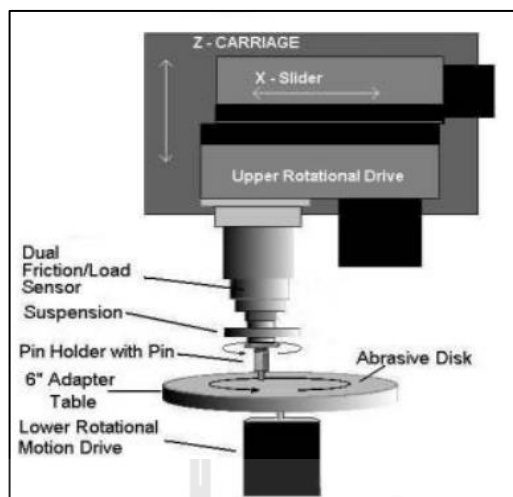
ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น

วิธีการตรวจสอบลักษณะผิวที่ผ่านการทดสอบแรงเสียดทานที่นิยมมากที่สุดคือการตรวจสอบด้วยวิธี SEM หรือการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning electron microscopy) โดยชิ้นทดสอบจะถูกจับยึดอย่างหนาแน่นด้วย carbon tape ติดเพื่อป้องกันการหลุดในระหว่างการตรวจสอบสูญญากาศ ซึ่งในการตรวจสอบชิ้นทดสอบ ต้องมีการปรับหมุนชิ้นงานระหว่างการตรวจสอบเพื่อหาตำแหน่งที่ชัดเจนของชิ้นทดสอบ

หลักการการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการได้ภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้

2.8.5 เครื่องทดสอบการสึกหรอ pin on disc

เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิสก์เป็นการจำลองกลไกการสึกหรอ ซึ่งนิยมใช้ในห้องทดสอบมากที่สุดเป็น เทคนิคการทดสอบการสึกหรอแบบหมุนกดบนจานหมุนหรือเครื่อง pin on disc โดยที่หมุดกดหรือชิ้นงานจะยึดติดอยู่กับที่ ซึ่งที่ปลายหมุดจะมีลักษณะเป็นบอลหรือ ครึ่งวงกลม ดังแสดงดังรูป 2.11 วัสดุจะเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันแต่จะมีข้อกำหนด คือ ชิ้นงานต้องมีขนาดที่แน่นอน และสามารถทนความเค้น (Stress) ที่เกิดขึ้น โดยไม่เกิดการโก่งงอ วิธีการทดสอบแบบหมุดกดนี้เป็นวิธี ที่ใช้ในการทดสอบกันอย่างแพร่หลาย ลักษณะของเครื่องมือคือ ปลายคานข้างหนึ่งจะแขวนน้ำหนักถ่วงที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ และหมุดกดที่ยึดตรงกลางคานจะกดลงบนจานที่หมุน โดยปลายอีกข้างหนึ่งจะยึดกับน้ำหนักถ่วงคู่ (Counter balance) การเคลื่อนที่แบบนี้ มีลักษณะคล้ายเครื่องเล่นแผ่นเสียง วัสดุที่ใช้ในการทดสอบจะถูกหัวหมุดกดเป็นวงกลมมีลักษณะเป็นร่องบนวัสดุ ซึ่งสามารถนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นได้



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของเครื่องไมโครไทรโบโลยีแบบ Pin on disc

2.9 การวิเคราะห์ทางสถิติ

สถิติเป็นศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการเก็บรวบรวมข้อมูล (Data Collection) การนำเสนอข้อมูล (Data Presentation) การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis) การแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบ การวิเคราะห์ทางสถิติจัดเป็นเครื่องมือพื้นฐานสำคัญที่จะให้ผลลัพธ์หรือข้อมูลเชิงตัวเลขที่นำไปแปลความหมายเพื่อประกอบการตัดสินใจได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

หลักการทางสถิติ เป็นองค์ประกอบหนึ่งของการค้นหาคำตอบของปัญหาหรือการปรับปรุงงานทางวิศวกรรม สามารถแบ่งสถิติออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) สถิติประเภทนี้ใช้ในการบรรยายลักษณะของข้อมูลที่รวบรวมมาจากประชากรหรือกลุ่มตัวอย่าง ผ่านการนำเสนอข้อมูลด้วยกราฟและแผนภาพต่าง ๆ เพื่อให้เห็นภาพการแจกแจงของข้อมูล จากนั้นสรุปและตีความหมายของข้อมูลในกลุ่มที่ศึกษาเท่านั้น นอกจากการนำเสนอข้อมูลแล้ว สถิติเชิงพรรณนายังรวมถึงการวิเคราะห์กลุ่มข้อมูลที่ศึกษาเพื่อหาความถี่ เปอร์เซ็นต์ เปอร์เซ็นไทล์

สถิติเชิงอนุมาน (Inferential Statistics) เป็นสถิติที่ใช้ข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างมาวิเคราะห์เพื่อคาดคะเนและสรุปคำตอบ ก่อนจะนำไปสู่การตัดสินใจเกี่ยวกับประชากรที่ศึกษาเป็นสถิติที่มีจุดประสงค์เพื่อการวินิจฉัยกลุ่มตัวอย่างเพื่อค้นหาข้อสรุปเกี่ยวกับประชาชน หลักการของสถิติเชิงอนุมานจะศึกษาในเรื่องทฤษฎีความน่าจะเป็น การสุ่มตัวอย่าง การประมาณค่าของประชากร และการทดสอบสมมติฐาน

การนิยามประชากร ประชากร (Population) หมายถึง กลุ่มของสิ่งต่าง ๆ ที่เราสนใจศึกษา เช่น กลุ่มของเครื่องจักร กลุ่มของวิศวกร โรงงาน กลุ่มของสินค้าที่ผลิต เป็นต้น หรือขอบเขต

ของข้อมูลที่กำลังศึกษา ตัวอย่าง (Sample) หมายถึง ประชากรจำนวนหนึ่งที่ได้ถูกเลือกออกมาเป็นตัวแทนของประชากรทั้งหมดที่เราสนใจศึกษา ทั้งนี้เนื่องจากมีข้อจำกัดด้านเวลา งบประมาณ ทรัพยากรหรือด้วยเหตุผลอื่น ๆ

ค่าที่บอกสภาพ ลักษณะ และคุณสมบัติของประชากร เรียกว่า พารามิเตอร์ (parameter) ส่วนค่าที่บอกสภาพ ลักษณะ และคุณสมบัติของตัวอย่าง เรียกว่า ค่าสถิติ (Statistic) ตัวอย่างของพารามิเตอร์และค่าสถิติที่พบบ่อย แสดงดังในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าที่บอกสภาพ ลักษณะ และคุณสมบัติของประชากร

ลักษณะสมบัติ	ของประชากร(พารามิเตอร์)	ของตัวอย่าง (ค่าสถิติ)
ค่าเฉลี่ย	μ	\bar{X}
ความแปรปรวน	σ^2	S^2
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	σ	s
สัดส่วน	p	\hat{p}

2.9.1 การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing)

เนื่องจากการเก็บรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์โดยการสำรวจข้อมูลเบื้องต้นไม่มีหลักฐานการทดสอบทางสถิติที่ชัดเจนสนับสนุนในการสรุปผล การวิเคราะห์ผลจากข้อมูลตัวอย่างทำได้เพียงการประมาณค่าแบบจุด (Point Estimation) เท่านั้น การทดสอบสมมติฐานถือเป็นกระบวนการทางสถิติที่เป็นทางเลือกหนึ่งในการสรุปข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะทางคุณภาพ (Quality Characteristic) ของระบบ หรือค่าพารามิเตอร์ที่สนใจของประชากรเพื่อใช้ประโยชน์ในทางวิศวกรรม แบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ

(i) กรณีสุ่มตัวอย่างเพียงหนึ่งชุด (One Sample) มีวัตถุประสงค์ในการสรุปข้อความเกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์หลัก คือ ค่าที่ชี้บ่งตำแหน่งของกระบวนการ (μ ; Mean) และค่าที่ใช้บอกการกระจายหรือความแตกต่างในระบบ (σ ; Variance) เพื่อประโยชน์ในการทราบถึงสภาพปัจจุบันของระบบหรือเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานข้อกำหนด (Specification)

(ii) กรณีสุ่มตัวอย่างสองชุด (Two Sample) มีวัตถุประสงค์ในการเปรียบเทียบว่าข้อมูลจากสองแหล่งที่แตกต่างกันหรือเงื่อนไขการผลิตที่แตกต่างกัน มีลักษณะเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร โดยทั่วไปจะทำการทดสอบค่าพารามิเตอร์หลัก คือ ผลต่างของค่าเฉลี่ย ($\mu_1 - \mu_2$) เมื่อพิจารณาว่าตำแหน่งระบบแตกต่างกันหรือไม่ ($\mu_1 - \mu_2 = 0?$) และอัตราส่วนของความแปรปรวน (σ_1^2 / σ_2^2) เพื่อพิจารณาว่าความแปรปรวนเท่ากันหรือไม่ ($\sigma_1^2 / \sigma_2^2 = 1?$) เนื่องจากในทางทฤษฎีทางสถิติ การแจกแจงของตัวทดสอบที่อธิบายค่าสถิติของค่าพารามิเตอร์ทั้งสองนี้สามารถระบุได้

หลักการทดสอบสมมติฐาน (Principles of Hypothesis Testing)

การอนุมานทางสถิติ (Inference Statistics or Inferential Statistics) คือ การสรุปข้อความเกี่ยวกับพารามิเตอร์ (ลักษณะที่แท้จริงของระบบ / กระบวนการ / ประชากร) ที่สนใจศึกษาวิธีการทดสอบสมมติฐานจัดว่าเป็นศาสตร์พื้นฐานของวิชาการอนุมานอื่น ๆ

การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing) คือ การทดสอบเพื่อสรุปหรือพิสูจน์ข้อความซึ่งเป็นข้อสมมติเกี่ยวกับระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษาว่า เป็นไปตามที่คาดคะเนไว้หรือไม่ จะแบ่งสมมติเป็นสองส่วนหลักเรียกว่า สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis) ประกอบด้วยข้อสมมติหรือข้อความที่ต้องการพิสูจน์ว่าเท็จ (Disprove) หรือข้อความที่ต้องการปฏิเสธและสมมติฐานอื่นหรือสมมติฐานรอง (Alternate or Alternative Hypothesis) ประกอบด้วย ข้อสมมติหรือข้อความที่ต้องการจะพิสูจน์ว่าจริง (Prove) หรือต้องการยอมรับ ยกเว้น กรณีที่พิสูจน์ว่าเท่ากัน เครื่องหมายเท่ากับจะปรากฏในสมมติฐานหลัก เนื่องจากวิธีการทดสอบจะต้องทำการกำหนดระดับการทดสอบ (Significance Level หรือ Type I error; α)

2.9.2 สหสัมพันธ์ (Correlation)

สหสัมพันธ์ คือ ธรรมชาติที่บอกทิศทางและขนาดของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองตัวหรือมากกว่าสองตัว ที่เราเลือกมาศึกษา ว่ามีความสัมพันธ์กันหรือไม่ในทิศทางใด

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร อันเป็นเป้าหมายของข้อสรุปงานวิจัยเพื่อให้เกิดความรู้ ความเข้าใจที่จะสามารถบรรยาย อธิบาย ตลอดจนควบคุมสิ่งต่าง ๆ ได้นั้น ค่าสถิติที่นำมาใช้บ่อยมาก คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r_{xy}) ซึ่งใช้ได้กับตัวแปร x และ y ที่มีมาตรการวัดแบบอันตรภาคขึ้นไป เพื่อให้เห็นภาพรวมของสถิติที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์ จึงขอเสนอตารางสรุประเบียบวิธีวัดความสัมพันธ์จำแนกตามมาตรวัดตัวแปรก่อน แล้วตามด้วยรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าที่บอกสภาพ ลักษณะ และคุณสมบัติของประชากร

สหสัมพันธ์แบบต่าง ๆ	สัญลักษณ์	ชนิดของตัวแปร x	ชนิดของตัวแปร y
Pearson Product Moment	r, r_{xy}	ต่อเนื่อง	ต่อเนื่อง
Spearman rank order	r_{sp}		
Phi (ฟี)	ϕ	Dichotomy แท้	Dichotomy แท้
Point Biserial	r_{pbis}	ต่อเนื่อง	Dichotomy แท้
Biserial	r_{bis}	ต่อเนื่อง	ทำต่อเนื่องแต่ถูกทำให้เป็น Dichotomy

สหสัมพันธ์มีหลายชนิด ที่รู้จักกันทั่วไปได้แก่ สหสัมพันธ์เชิงเดี่ยว (Simple Correlation) สหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Correlation) นอกจากนั้นจากสหสัมพันธ์นี้ยังวิเคราะห์ต่อไปได้อีกเช่น การวิเคราะห์ถดถอย (Regression Analysis)

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์อย่างง่าย (Simple Correlation Analysis)

เป็นการศึกษาระดับความสัมพันธ์ของ X กับ Y ว่า มีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด และมีทิศทางความสัมพันธ์อย่างไร เมื่อ X เป็นตัวแปรอิสระ และ Y เป็นตัวแปรตาม ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อย่างง่าย (Simple Correlation Coefficient) เป็นค่าที่วัดความสัมพันธ์ของ X กับ Y ว่ามีขนาดและทิศทางของความสัมพันธ์อย่างไรกำหนดให้ p คือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อย่างง่ายของประชากร เมื่อ $-1 \leq p \leq 1$ เนื่องจากในการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ ไม่ได้เก็บข้อมูลจากประชากรแต่เป็นการเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ จึงเป็นค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อย่างง่ายของตัวอย่าง โดยใช้สัญลักษณ์ ว่า r เมื่อ $-1 \leq r \leq 1$

$$\text{สูตรในการคำนวณหาค่า } r \text{ คือ } r = \frac{\sum xy - n\bar{x}\bar{y}}{\sqrt{\sum (xi^2 - n\bar{x}^2)} \sqrt{\sum (yi^2 - n\bar{y}^2)}} \quad (2.3)$$

เมื่อ n = จำนวนตัวอย่าง

\bar{x} = ค่าเฉลี่ยของตัวแปร x

\bar{y} = ค่าเฉลี่ยของตัวแปร y

ความหมายของค่า r

- ค่า r เป็น + แสดงว่า x กับ y มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน
- ค่า r เป็น - แสดงว่า x กับ y มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม
- ค่า r เป็น 0 แสดงว่า x กับ y ไม่มีความสัมพันธ์กันเลย
- ค่า $|r|$ มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่า x กับ y มีความสัมพันธ์กันมาก
- ค่า $|r|$ มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่า x กับ y มีความสัมพันธ์กันน้อย

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination) เป็นค่าที่แสดงว่าตัวแปร x มีอิทธิพลต่อตัวแปร y มากน้อยเพียงใด โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ มีค่าเท่ากับ กำลังสองของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ หรือ r^2 โดยที่ $0 \leq r^2 \leq 1$

2.9.3 การวิเคราะห์ถดถอย (Regression Analysis)

การวิเคราะห์ถดถอย เป็นวิธีการทางสถิติที่ศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ทราบค่า เรียกว่าตัวแปรอิสระ (Independent variation) หรือเรียกว่าตัวพยากรณ์ (Prediction) นิยมใช้สัญลักษณ์ X ซึ่งสามารถนำมาพยากรณ์ค่าตัวแปรอีกตัวหนึ่งได้ เรียกว่า ตัวแปรตาม (Dependent variation) ใช้สัญลักษณ์ Y ข้อแตกต่างระหว่างการถดถอยกับการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ คือ การวิเคราะห์สหสัมพันธ์เพียงแต่ศึกษาว่าตัวแปรมีความสัมพันธ์กันมากน้อยหรือไม่ มีขนาดและทิศทางเป็นอย่างไร แต่ไม่ได้ใช้พยากรณ์ ส่วนการวิเคราะห์การถดถอยสามารถใช้พยากรณ์ได้ด้วย

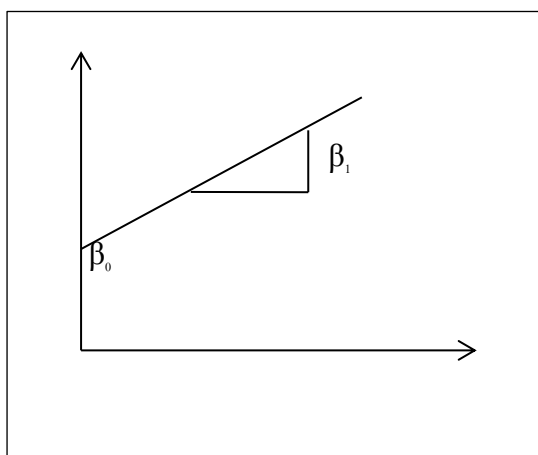
การวิเคราะห์ถดถอยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

1. การวิเคราะห์ถดถอยอย่างง่าย (Simple Regression Analysis)
2. การวิเคราะห์ถดถอยเชิงซ้อน (Multiple Regression Analysis)

การศึกษถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว ที่สามารถบอกได้ว่าตัวแปรใดเป็นอิสระ และตัวแปรใดเป็นตัวแปรตาม ซึ่งความสัมพันธ์ ของตัวแปรทั้งสองจะอยู่ในรูปแบบใด ๆ เช่น เส้นตรง เส้นโค้ง ฯลฯ ในระดับนี้จะกล่าวถึงเฉพาะความสัมพันธ์ลักษณะเส้นตรงเท่านั้น ซึ่งเรียกว่า การวิเคราะห์ถดถอยอย่างง่าย (Simple Regression Analysis) ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเชิงเส้นหรือเส้นตรง

สมการถดถอยของตัวอย่างเขียนในรูปของค่าสถิติ ได้คือ

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.12 สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

โดยที่ β_0 เป็นค่าของจุดตัด (intercept) ของเส้นตรงกับแกน y และ β_1 เป็นค่าความชันของสมการ (slope) นั้น ซึ่งต่างก็เป็นตัวแปรที่ยังไม่ทราบค่า และ ε คือค่าความคลาดเคลื่อนของการสุ่ม โดยความคลาดเคลื่อนนี้มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีค่าความแปรปรวน (σ^2) ที่ยังไม่ทราบค่า โดยค่าของความคลาดเคลื่อนหนึ่ง ๆ นั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าของคลาดเคลื่อนใด ๆ

2.10 ปรัชญ่วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สเป็นหนึ่งในกระบวนการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าที่พบได้ในงานวิจัยและภาคอุตสาหกรรมโดยทั่วไป ซึ่งถูกนำไปประยุกต์ใช้งานและศึกษาวิจัยอย่างแพร่หลายทำให้เกิดองค์ความรู้ใหม่อยู่เสมอ ช่วยในการพัฒนากระบวนการผลิตให้รวดเร็วและก้าวหน้ามากขึ้น สำหรับการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาและค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Wang Lijie, Xing Yazhe, Wang Hongbo, and Hao Jianmin ได้ศึกษา Ti-6Al-4V อัลลอย โดยการทำการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สในทรายคิงและซัลเฟอร์ไรซิง สํารวจโครงสร้างโดยใช้เครื่อง SEM และ XRD ในการวิเคราะห์ธาตุประกอบต่าง ๆ การทดสอบการสึกหรอ ผลระบุว่าธาตุประกอบที่เป็นธาตุ ที่สำคัญในองค์ประกอบคือ Ti_2N , TiN , TiS_2 พบอีกว่าซัลไฟด์เป็นตัวช่วยในเรื่องการเกิดฟิล์มหล่อลื่นในระหว่างการทดสอบ ช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของอัลลอย

B. Selcuk, R. Ipek, M.B. Karamis, V. Kuzucucu ได้ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการไบโรดและคาร์ไบโรดของเหล็กเกรด AISI 1020 และ AISI 5115 ชิ้นงานที่ถูกเตรียมจะนำไปเข้ากระบวนการไบโรดและคาร์ไบโรด จากนั้นนำไปสํารวจโครงสร้างและค่าความแข็ง ก่อนและหลังการทดสอบการสึกหรอ พื้นผิวชิ้นทดสอบจะถูกนำไปวิเคราะห์โดยเครื่อง XRD เฟส Fe_2B ถูกพบในชั้นของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการไบโรดเหล็ก AISI 1020 ที่ผ่านกระบวนการไบโรด มีการสูญเสียน้ำหนักที่มากกว่า AISI 5115

B. Selcuk, R. Ipek, M.B. Karamis ได้ศึกษาเกี่ยวกับแรงเสียดทานและลักษณะการสึกหรอ ของเหล็กเกรด AISI 1020 และ AISI 5115 พื้นผิวชิ้นทดสอบถูกปรับปรุงด้วยกรรมวิธีคาร์เบอร์ไรซิงคาร์ไบโรดในทรายคิง และไบโรไนซิง ชิ้นงานจะถูกนำไปเข้ากระบวนการแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง และแก๊สคาร์ไบโรดในทรายคิง และไบโรไนซิง จากนั้นจะถูกไปวัดค่าความแข็งและตรวจสอบโครงสร้าง หาธาตุประกอบในชิ้นงานโดยเครื่อง XRD การทดสอบการสึกหรอทดสอบโดยเครื่อง pin-on-disc จากเครื่องนี้เราจะได้น้ำหนักที่สูญเสียบของชิ้นงาน ลักษณะของชิ้นงานจะถูกตรวจสอบบริเวณผิวหน้าชิ้นงาน เหล็กเกรด AISI 1020 ถูกนำมาทดสอบและเปรียบเทียบในกระบวนการอบชุบต่าง ๆ พบว่ากระบวนการไบโรไนซิงมีผลต่อเหล็กผสมอัลลอย ในขณะที่เหล็ก AISI 5115 ที่ผ่านกระบวนการไบโรไนซิงมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำที่สุด ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานขึ้นกับความแข็งผิว

Somsak Siwadamrongpong and Natthakit Suwanta ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบต่อกระบวนการชุบแข็งผิวร่วมระหว่างแก๊สซอพท์ในทรายดิงและแก๊สคาร์เบอร์โรซิงต่อสมบัติความแข็งของเหล็กกล้าผสม ผลการทดลองพบว่า กระบวนการร่วม SN+CB ช่วยปรับปรุงสมบัติความแข็งให้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งความแข็งผิว ส่วนค่าความลึกผิวแข็งมีความสม่ำเสมอและความแปรปรวนต่ำนอกจากนั้นกระบวนการร่วม CB+SN มีความแข็งผิวใกล้เคียงกับกระบวนการอื่น แต่พบชั้นผิวขาวที่บางกว่า

Gas Sulphonitriding ได้ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการอบชุบใหม่ กระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ไนโตรรายดิง เปรียบเทียบกับกระบวนการซัลนิเฟอร์และเทนนิเฟอร์ที่ได้ทำไว้ก่อนหน้านี้ การทดสอบทางด้านไทรโบโลยี ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบชุบแก๊สซัลเฟอร์ไนโตรรายดิงมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการของซัลนิเฟอร์และเทนนิเฟอร์ ซึ่งได้นำมาเปรียบเทียบกับกัน

Linhu Tang, Chengxiu Gao, Jianlong Huang Zhang and Wenchun Chang ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของความเร็รรอบและความแข็งผิวต่อแรงเสียดทานในเหล็กกล้าเครื่องมือ D2 ที่ความแข็งต่างกัน โดยการสึกหรอใช้การทดสอบแบบบอลออนดิสก์ ตัวชิ้นทดสอบบอลคือ ซิลิกอนไนไตรด์ที่มีค่าความแข็งแตกต่างกัน ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบแบบสภาวะไร้สารหล่อลื่น ผลการวิเคราะห์พบว่าอิทธิพลค่าความแข็งต่อสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ความเร็วรอบ 0.05 และ 0.5 เมตรต่อวินาที มีความโดดเด่นมากกว่าความเร็วรอบที่ 0.1 เมตรต่อวินาที และผลการทดสอบการสึกหรอพบว่า ความเร็รรอบและความแข็งผิวมีผลต่อการสึกหรอเป็นอย่างมาก

L. Bourithis et al. ชิ้นงาน AISI D2 และ O2 อบชุบโดยกระบวนการทางความร้อน ให้ค่าความแข็งอยู่ที่ 700 Hv (60 HRC) และทดสอบการสึกหรอที่ 3 เงื่อนไขการสึกหรอแบบยึดติด, และการสึกหรอแบบขูดขีด 3 body, 2 body ใช้เครื่องมือการทดสอบพินส์ออนดิสก์ โดยใช้ล้อจากทรายกับยาง และตัวหมุนบนกระดาดทรายถึงแม้ว่า ชิ้นทดสอบทั้งสองจะถูกนำมาทำให้มีความแข็งที่เท่ากัน แต่นำมาทดสอบรูปแบบการสึกหรอ 3 แบบ จากผลการทดลองพบว่า โครงสร้างของชิ้นทดสอบ มีบทบาทสำคัญมากในการเกิดการสึกหรอ ช่วงความเร็วรอบในการทดสอบต่ำ ๆ AISI O1 มีค่าการสึกหรอที่ดีกว่า AISI D2 ในช่วงความเร็วรอบสูง ๆ ตรวจพบเจอการเกิด ออกซิเดชันบนพื้นผิวของ AISI D2. การเกิดการสึกหรอของชิ้นทดสอบทั้งสองพบการสึกหรอแบบขูดขีด เป็นสัดส่วนกับโพลดกดทับ ในกรณีการสึกหรอแบบขูดขีด AISI D2 มีการปรับปรุงโดยการอบปกติ มีค่าต่ำกว่า AISI O1 และทำให้เกิด คาร์ไบด์ที่มีความแข็งในโครงสร้าง ในชิ้นทดสอบทั้งสองประเภท 3-8 ครั้ง มีค่าการสึกหรอแบบขูดขีด 3 body ดีกว่า 2 body

Mirjani, M., et al. (2009) ได้ศึกษาการต้านทานการสึกหรอในชิ้นงานที่ทำด้วยเหล็กกล้า C60W และผ่านกระบวนการไนโตรคาร์บูไรซิง (ซอฟต์แวร์ไนตรายดิง) ทั้งแบบพลาสมาและแบบแก๊ส ที่อุณหภูมิ 570°C เป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมง จากงานวิจัยพบว่า เกิดโครงสร้าง ϵ และ γ' ขึ้นที่ผิวชั้นทดสอบในทุกกระบวนการ โดยระยะเวลาในการอบชุบแข็งผิวที่มากขึ้นส่งผลให้ ชั้นความหนาของโครงสร้างดังกล่าวเพิ่มมากขึ้น แต่จะมีความต้านทานการสึกหรอลดลง และชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการไนโตรคาร์บูไรซิง แบบพลาสมา จะมีค่าความลึกผิวแข็งที่มีประสิทธิภาพมากกว่าการอบชุบแบบแก๊ส

Fattah, M., and Mahboubi, F. (2012) ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและการต้านทานการกัดกร่อนในเหล็กกล้าผสม AISI 4140 ที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยพลาสมาไนโตรคาร์บูไรซิง ที่อุณหภูมิในช่วง 520-620°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากผลการวิจัยพบว่าที่อุณหภูมิ 620°C เกิดชั้นสารประกอบที่ผิวแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ ส่วนที่มีรูพรุน และโครงสร้างรูปเสาเหลี่ยม ส่วนที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะพบโครงสร้างแบบเดี่ยว ความแข็งผิวจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการอบชุบ นอกจากนี้ยังพบว่า ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 545°C ชั้นทดสอบมีความต้านทานการกัดกร่อนสูงสุด

Michel J.Korwin, Christopher D.Morawski, and George J.Tymowski กระบวนการแก๊สซอฟต์แวร์ไนตรายดิงเป็นการเพิ่มธาตุไนโตรเจนให้กับเหล็กในสภาพ Ferrite เพราะจะกระทำที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 500-590 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิช่วงนี้ เหล็กยังคงสภาพเป็น Ferrite และอุณหภูมิช่วงนี้เป็นช่วงที่เหล็ก Ferrite จะยอมให้อะตอมไนโตรเจนละลายได้สูงสุดประมาณ 0.1 % และที่อุณหภูมินี้จะเกิดปฏิกิริยา Eutectoid ของ Austenite (2.35%N) แยกตัวให้ Ferrite (0.1%N) กับไนตรายของเหล็ก (Fe_4N หรือ γ') ที่มีไนโตรเจน 5.5-5.9 %

Journal of the Japan Institute of Metals, supra, vol.51, No. 10 pp” 930-931 (1987) ในการทดลองได้นำชิ้นทดสอบ ไปทำการขัดมันให้แก่ผิวหน้าชั้นทดสอบ และเข้าไปสู่กระบวนการซัลไฟไนตรายดิง อย่างไรก็ตามในการศึกษาพบว่า ชิ้นส่วนในการทดสอบ *sliding* ที่ทำการขัดมันผิวหน้าชั้นทดสอบก่อนเข้ากระบวนการซัลไฟไนตรายดิง ให้ค่าการสึกหรอที่ไม่ดีและมีค่าต่ำ และพบว่าเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเสียหายแบบยึดติดที่ค่อนข้างรุนแรงภายในระยะเวลาการทดสอบเพียงสั้น

R.Sola, R. Giovanardi, P. Veronesi, G. Poli ในการทดลองได้นำชิ้นทดสอบเหล็ก เกรด 20MnCr5, 42CrMo4 และเหล็กหล่อ GS600, G30 นำชิ้นทดสอบทั้ง 4 เกรด ไปทำการเตรียมผิวการทดสอบโดยการขัดด้วยกระดาษทรายถึงเบอร์ 2000 จากนั้นนำไปชุบแข็งผิวด้วยวิธีไนโตรคาร์เบอร์ไรซิ่ง นำไปทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและการสึกหรอ ด้วยวิธี ball on disc ผลการทดลองพบว่ากระบวนการไนโตรคาร์เบอร์ไรซิ่งเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อเทียบกับชิ้นทดสอบที่ยังไม่ผ่านการอบชุบ อธิบายได้ว่าค่าความหยาบผิวก่อนการทดสอบ ($R_a = 0.57 \mu\text{m}$) มีความหยาบผิวน้อยกว่าหลังการอบชุบด้วยกระบวนการไนโตรคาร์เบอร์ไรซิ่ง ($R_a = 1.33 \mu\text{m}$)



บทที่ 3

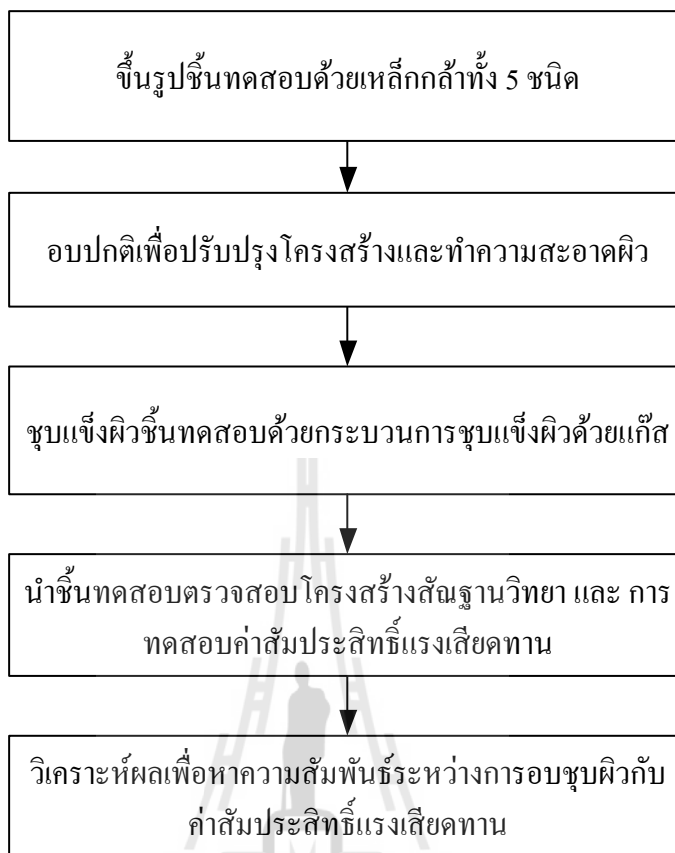
วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 กล่าวนำ

จากที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้ได้สังเกตเห็นถึงความสำคัญและประโยชน์ของเหล็กกล้าที่ใช้งานกันอย่างกว้างขวาง สามารถปรับปรุงคุณสมบัติให้เหมาะสมกับสภาวะที่ต้องการได้จึงได้ทำการค้นคว้าศึกษาทำการทดลองกระบวนการต่อคุณสมบัติค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของเหล็กกล้า ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของกระบวนการอบชุบการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สต่าง ๆ ได้แก่ ซอฟต์ไนตรายดิง, ซัลเฟอร์ไนตรายดิง เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กกล้าให้ดีขึ้น โดยเฉพาะในเรื่องคุณสมบัติค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน เป็นคุณสมบัติสำคัญอันหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อการใช้งาน เช่น การประกอบ การเคลื่อนไหว รวมไปถึงการใช้พลังงานของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น จึงเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กระบวนการชุบแข็งผิวดังกล่าว เพื่อพัฒนาอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์เหล็กกล้าต่าง ๆ ทั้งเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม เพื่อการเลือกใช้งานเช่น การประกอบ การเคลื่อนไหว ในอนาคตต่อไป

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาผลของการชุบแข็งผิวที่ส่งผลต่อชิ้นตัวอย่างเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม โดยทำการออกแบบการทดลองขั้นทดสอบในการดำเนินงานวิจัยดังนี้

สำหรับงานวิจัยในบทนี้ได้นำเสนอในส่วนของการเตรียมชิ้นทดสอบ การเตรียมผิวชิ้นทดสอบด้วยการอบปกติและทำความสะอาดผิวด้วยการยิงเม็ดโลหะ จากนั้นนำชิ้นทดสอบไปขัดด้วยกระดาษทรายเรียงเบอร์ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งเบอร์ 2000 นำชิ้นทดสอบไปชุบแข็งผิวด้วยวิธีการแก๊สซอฟต์ไนตรายดิง และแก๊สซัลเฟอร์ไนตรายดิง นำไปทดสอบคุณสมบัติ วิเคราะห์โครงสร้างทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและสภาพพื้นฐานวิทยา



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 การเตรียมแผ่นทดสอบ

เหล็กเครื่องมือ (Tool steels) หมายถึงเหล็กที่ใช้ทำอุปกรณ์การตัดโลหะหรือการขึ้นรูปโลหะและอื่น ๆ ซึ่งสามารถจำแนกออกไปได้กว้างขวางตามลักษณะการใช้งาน เช่น เหล็กทำเครื่องมือร้อน (Hot working tool) หรือทำเครื่องมือเย็น (Cold working tool) เหล็กเครื่องมือทนแรงกระแทก (Shock-resisting) และเหล็กทำเครื่องมือตัดความเร็วสูง (High speed steel) เป็นต้น

เหล็กที่ใช้ในการศึกษาและนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นกลม นั้น คือ เหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น (%wt, Balance Fe)

Material	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Fe
AISI D2	1.43	0.166	0.226	11.95	0.629	0.738	Bal.

กลุ่มผสมโครเมียมและคาร์บอนสูง (D) อาจผสมวานาเดียมและโคบอลต์ บางครั้งได้ชื่อเรียกว่า เหล็กกล้าเครื่องมือ Lederburetic เนื่องจากโครงสร้างจะประกอบด้วย โครเมียมคาร์ไบด์ตกผลึกอยู่ตามขอบเกรน ในลักษณะโครงสร้างยูเทคติก เป็นกลุ่มที่มีการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น ธาตุผสมหลักคือ คาร์บอน โครเมียม และ โมลิบดีนัม โดยมีคุณสมบัติต้านทานการสึกหรอสูงเป็นพิเศษ และการเสียดสีดีเยี่ยม เป็นผลมาจากการมีปริมาณคาร์ไบด์สูง (มนัส สติรจินดา , 2543)

3.3 การเตรียมชิ้นทดสอบ

การเตรียมชิ้นทดสอบนี้แบ่งออกเป็น เหล็ก 2 กลุ่ม ดังนี้

3.2.1 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง

เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง มีคาร์บอนตั้งแต่ 0.2-0.5% เป็นเหล็กที่มีความแข็งแรง ใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องจักรทั่วไป ชิ้นทดสอบทำจากวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน ตามมาตรฐานสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งอเมริกา (AISI) ตามตารางที่ 3.2 โดยใช้เหล็กเกรด AISI 1010, AISI 1020, AISI 1040

3.2.2 เหล็กกล้าผสม

เหล็กกล้าผสม เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่ เช่น โครเมียม, นิกเกิล, โมลิบดีนัม, วานาเดียม และ โคบอลต์ เป็นต้น เพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง ชิ้นทดสอบทำจากวัสดุเหล็กกล้าผสม โดยกำหนดเปอร์เซ็นต์คาร์บอนมีปริมาณเท่ากัน ตามตารางที่ 3.2 โดยใช้เหล็กเกรด AISI 4140, AISI 4340

ตารางที่ 3.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม (%wt, Balance Fe)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	V	Fe
AISI 1010	0.1434	0.2411	0.4387	0.01263	0.01244	0.0485	0.00163	0.01853	0.02481	0.01782	0.00131	Bal.
AISI 1020	0.2383	0.2222	0.3754	0.022	0.01416	0.0322	0.00192	0.01201	0.01777	0.02692	0.0018	Bal.
AISI 1040	0.4292	0.2378	0.6617	0.02171	0.01361	0.0568	0.01151	0.04592	0.00631	0.2152	0.00162	Bal.
AISI 4140	0.4171	0.2222	0.7127	0.00775	0.00532	1.098	0.16121	0.03901	0.02015	0.1674	0.00748	Bal.
AISI 4340	0.4057	0.2321	0.6614	0.00882	0.00584	1.0527	0.1707	1.7194	0.03621	0.02534	0.00274	Bal.

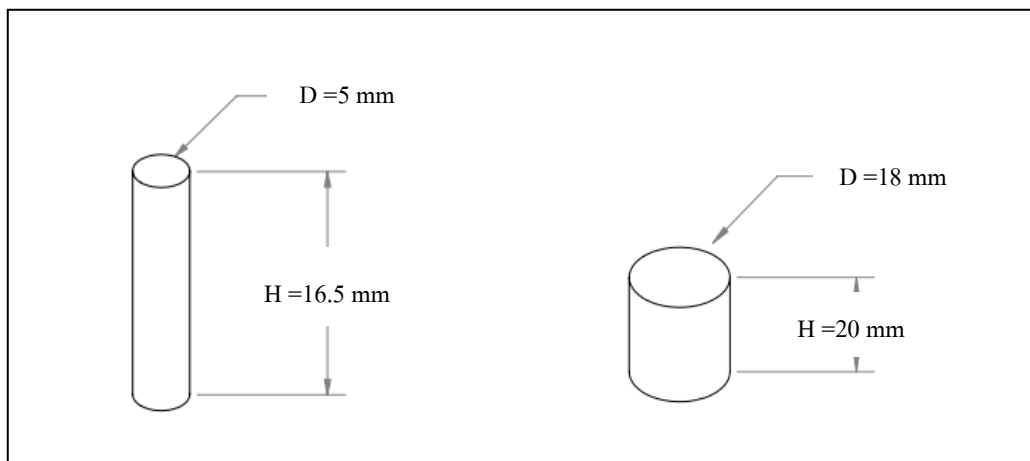
3.2.3 การปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการอบปกติ

เหล็กทั่วไปผ่านการหล่อ หรือการรีดขึ้นรูปมา มักจะมีความแข็งหรือความเหนียวไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งแท่ง ซึ่งส่งผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบทั้งความสม่ำเสมอและความหยาบของเกรน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการอบปกติ เพื่อช่วยปรับปรุงในเรื่องการลดขนาดเกรนของเหล็ก เพื่อให้คุณสมบัติของเหล็กสม่ำเสมอ และในขณะเดียวกันช่วยในการลดความเครียดภายในด้วย เพื่อเป็นการสร้างมาตรฐานเดียวกันให้แก่ชิ้นทดสอบเพื่อให้อยู่ภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานเดียวกัน

โดยการอบปกติต้องเผาชิ้นทดสอบให้เหล็กร้อนจนกลายเป็นออสเตนไนต์ที่อุณหภูมิเหนือเส้นวิกฤตบน A_3 ประมาณ $30 - 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนที่อยู่ในชิ้นทดสอบ จากนั้นทิ้งไว้ที่อุณหภูมินี้ประมาณ $30 - 60$ นาที ต่อความหนาเฉลี่ย 25 มม. ระยะเวลาต้องเพียงพอต่อการเป็นออสเตนไนต์ (Austenitizing) ทั้งหมด เพื่อให้ความร้อนกระจายทั่วทั้งชิ้นงาน และมีความสม่ำเสมอทั้งผิวนอกและแกนกลางของชิ้นงานเวลาที่ใช้ในการอบแช่ขึ้นขึ้นอยู่กับขนาดชิ้นทดสอบ อุณหภูมิการแช่ต้องสูงเพียงพอที่ทำให้คาร์ไบด์ละลายตัวเป็นออสเตนไนต์ทั้งหมดในเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์จะน้อยลงและลักษณะการต่อเนื่องตามขอบเกรนจะลดน้อยลง คุณสมบัติของโครงสร้างที่ประกอบด้วยเฟอไรต์มีความละเอียดเช่นนี้ จะทำให้เหล็กมีความแข็งแรง และความแข็งสูงกว่าเหล็กที่ผ่านการอบอ่อน

ตารางที่ 3.3 แสดงเงื่อนไขการอบปกติที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจาก AISI 1010, AISI 1020, AISI 1040, AISI 4140, AISI 4340

AISI	ขนาดของชิ้นทดสอบ	อุณหภูมิอบปกติ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลาอบ (นาที)
1010	ทรงกระบอก 5 มม.	930	45
1010	ทรงกระบอก 18 มม.	930	60
1020	ทรงกระบอก 5 มม.	930	45
1020	ทรงกระบอก 18 มม.	930	60
1040	ทรงกระบอก 5 มม.	870	45
1040	ทรงกระบอก 18 มม.	870	60
4140	ทรงกระบอก 5 มม.	870	45
4140	ทรงกระบอก 18 มม.	870	60
4340	ทรงกระบอก 5 มม.	870	45
4340	ทรงกระบอก 18 มม.	870	60



รูปที่ 3.2 ชั้นทดสอบทรงกระบอก

(ก) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มม. (ข) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 มม.

3.4 การเตรียมผิวชั้นทดสอบ

3.4.1 การพ่นทำความสะอาดผิวชั้นทดสอบ

การพ่นทำความสะอาดผิวชั้นทดสอบด้วยการพ่นเม็ดโลหะ การเลือกใช้วัสดุในการพ่นต้องพิจารณาจากชิ้นงานที่จะพ่นและวัสดุที่ใช้พ่นด้วยโดยคำนึงถึงขนาด รูปร่าง รายละเอียดพื้นผิวที่ต้องการหลังการพ่น และกระบวนการต่าง ๆ ที่จะตามมาหลังจากการพ่นทำความสะอาดเสร็จแล้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นผิวที่ประกอบด้วยเหล็ก จะทำปฏิกิริยาได้เร็วมากภายหลังจากการพ่นทำความสะอาด ฉะนั้นแล้ว กระบวนการอื่น ๆ เช่น การชุบเคลือบต่าง ๆ ควรกระทำต่อทันที หลังจากพ่นทำความสะอาดเสร็จ สารพ่นที่เป็นโลหะ มักมีรูปร่างเป็น เม็ดโลหะเหลี่ยม เม็ดโลหะกลม และ เส้นลวดโลหะ เม็ดโลหะกลม มักทำมาจากวัสดุประเภทเดียวกับ เม็ดโลหะเหลี่ยม หากแต่มีรูปทรงมนกลม สารพ่นเป็นอื่นต่าง ๆ บนพื้นผิวที่ทำการพ่นใส่ โดยแรงกระแทกล้วน ๆ เม็ดเหล็กกลมเป็นชนิดที่ได้รับความนิยมใช้สูงสุด และ กระทบ ทำลาย พื้นผิวที่พ่นใส่น้อยที่สุด หากพ่นเม็ดเหล็กบนพื้นผิวโลหะ จะได้พื้นผิวที่ด้าน ไร้ความเงาวาว และสามารถควบคุมระดับความด้านไม่เงาวาวนั้นเลือกได้โดยขนาดของเม็ดเหล็ก (ผ่านตะแกรง) และ ความเร็วของเม็ดเหล็กเวลาพ่น

ชั้นทดสอบจะถูกนำมาพ่นด้วยเม็ดโลหะแบบบอล ขนาด 0.3 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการทำความสะอาดผิว 45 นาทีด้วยเครื่องยิงเม็ดโลหะ (Shot Blasting Machine) GROWELL รุ่น GW-10



รูปที่ 3.3 เครื่องพ่นทำความสะอาดผิวชิ้นทดสอบ

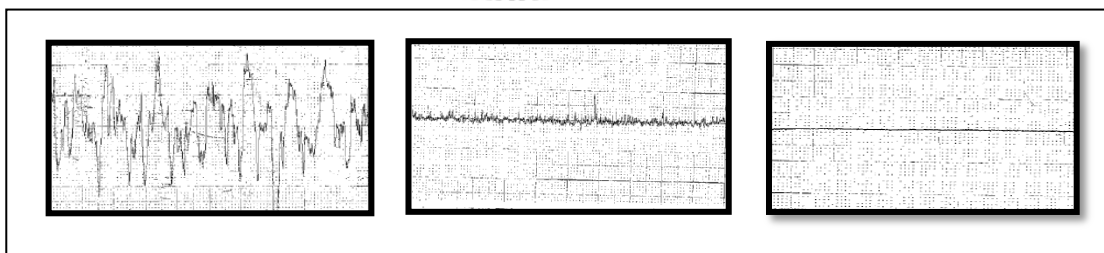
3.4.2 การขัดผิวชิ้นทดสอบ

การเตรียมผิวทดสอบ แบ่งผิวออกเป็น 3 ประเภท

ก. ผิวที่ผ่านการพ่นทำความสะอาดด้วยเม็ดโลหะ

ข. ผิวที่ผ่านการพ่นทำความสะอาดด้วยเม็ดโลหะ และ ผิวที่ผ่านการขัดด้วย
กระดาษทรายเบอร์ 2000

ค. ผิวที่ผ่านการพ่นทำความสะอาดด้วยเม็ดโลหะ และ ผ่านการขัดด้วยกระดาษ
เบอร์ 2000 ตามด้วยอะลูมินา 0.3 ไมครอน



ก) $R_z = 26.04 \mu\text{m}$

ข) $R_z = 4.230 \mu\text{m}$

ค) $R_z = 0.413 \mu\text{m}$

รูปที่ 3.4 ความหยาบผิวชิ้นทดสอบ

3.4.3 กระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส

การชุบแข็งผิว (Surface hardening method) เป็นการชุบแข็งเพื่อให้ได้ความแข็งแรงเฉพาะตามบริเวณผิวเท่านั้นเป็นการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมีของผิวเหล็ก ความแข็งผิวอาจได้จากการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมีที่ผิวโดยตรง ในการเติมธาตุผสมเพื่อให้ผิวมีความแข็งแรงขึ้นนั้นสามารถทำได้หลายสถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม วิธีที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรมคือแบบแก๊ส ซึ่งช่วยประหยัดเวลาในการชุบแข็งผิวได้

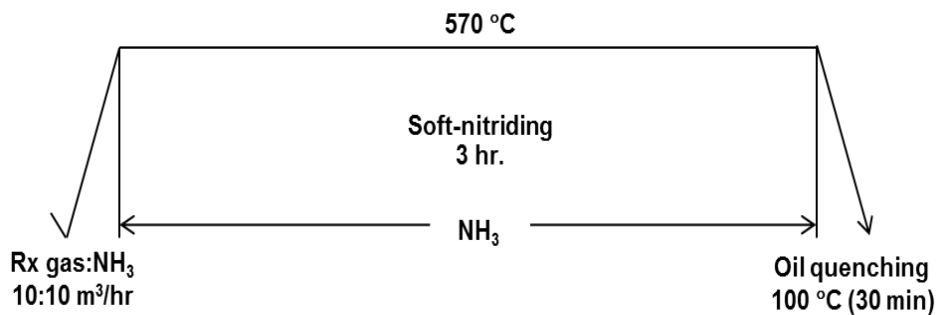
ชิ้นทดสอบที่ผ่านการเตรียมผิวทดสอบแล้ว จะถูกนำมาเข้ากระบวนการอบชุบแข็งผิวทั้งหมด 2 กระบวนการคือ

- 1) แก๊สซอฟต์ไนไตรดิง (Gas Soft-nitriding)
- 2) แก๊สซัลเฟอร์ไนไตรดิง (Gas Sulfur-nitriding)

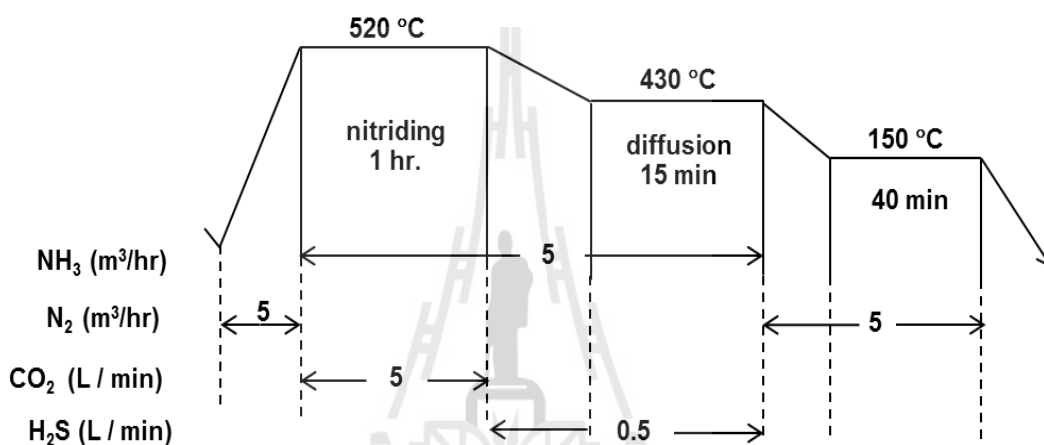
กระบวนการทั้งสอง กระบวนการนี้เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส มีข้อดีคือ สามารถควบคุมปริมาณคาร์บอนในเตาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยประหยัดเวลา ช่วยในเรื่องของความหนาของผิวแข็งที่ทำได้นั้นน้อยกว่าและประการสุดท้ายในเรื่องต้นทุน ทั้งสองกระบวนการนี้มีจุดเด่นในเรื่องการปรับปรุงคุณสมบัติด้านการสึกหรอ และในเรื่องของการปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานอีกด้วย ในการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สนั้น จะมีการอบชุบความร้อนภายในเตาที่ควบคุมบรรยากาศ มีความมุ่งหมายสำคัญ คือ ป้องกันการสูญเสียคาร์บอนและธาตุอื่น ๆ ที่สำคัญ ขณะทำการเผาในระยะเวลาอันยาวนาน ป้องกันการเกิดออกไซด์ตามบริเวณผิวทำให้เกิดปัญหาการกำจัดภายหลัง ในกรณีที่ต้องการปรับปรุงความแข็งบริเวณผิวแห้งเหล็กให้สูงขึ้นสามารถกระทำได้ด้วยการควบคุมบรรยากาศภายในเตา การควบคุมปริมาณแก๊สให้เป็นไปด้วยดีนั้นควบคุมยาก เพราะถ้าปริมาณแก๊สผ่านเตาในปริมาณน้อยเกินไป ปริมาณคาร์บอนที่ผิวจะต่ำ ซึ่งในกระบวนการทั้งสองนี้ กระบวนการนี้

กระบวนการแก๊สซอฟต์ไนไตรดิง เป็นกระบวนการอบชุบทาง Thermochemical เป็นการเติมทั้งปริมาณไนโตรเจนและคาร์บอนให้กับบริเวณผิวของชิ้นทดสอบ ในสภาพเหล็กเฟอร์ไรต์ และภายใต้ชั้นการแพร่จะพบไนโตรเจนเป็นจำนวนมาก กระบวนการนี้มักทำภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 590 องศาเซลเซียส ในชั้นบรรยากาศจะประกอบด้วย NH_3 (แอมโมเนีย) และเอ็นโดเทอร์มิกส์ แก๊สจำพวก โพรเพน

กระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ไนไตรดิง เป็นกระบวนการอบชุบทาง Thermochemical ในกระบวนการนี้เป็นการเติมทั้งปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์ ให้แก่ผิวชิ้นทดสอบ และทำให้เกิดอะตอมของไนโตรเจนจะแพร่ซึมเข้าสู่แห้งเหล็ก แล้วรวมตัวกันเป็นเหล็กไนไตรด์ เกิดขึ้นในกระบวนการนี้ ภายใต้ชั้น การแพร่ (diffusion zone) มักพบปริมาณไนโตรเจน



(ก) กระบวนการชุบแข็งแก๊สซอฟต์ไนตรายคิง



(ข) กระบวนการชุบแข็งแก๊สซัลเฟอร์ไนตรายคิง

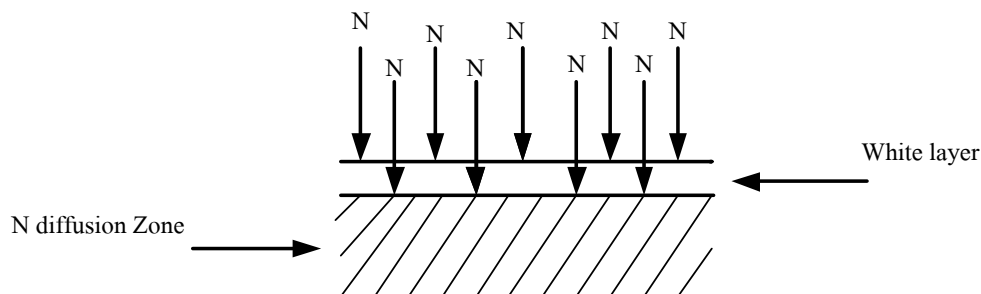
รูปที่ 3.5 แสดงกระบวนการชุบแข็งผิวที่ใช้ในการทดลอง

3.5 การตรวจสอบโครงสร้างชั้นผิวขาว

ชิ้นทดสอบจะถูกนำมาตรวจสอบโครงสร้างชั้นผิวขาว ต้องผ่านการเตรียมผิวโดยการขัดด้วยกระดาษทรายโดยเรียงจากกระดาษทรายหยาบไปจนถึงละเอียด ด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 320, 600, 800, 1000, 1200 จากนั้นนำไปลงหม้อสั๊กหลาดขัดด้วยอลูมิน่า 0.3 ไมครอน จากนั้นนำชิ้นงานไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบใช้แสง (Optical microscope)

โครงสร้างชั้นผิวขาว เป็นการสร้างชั้นผิวแข็งที่เป็นสารประกอบขึ้นที่ผิวชั้นนอกสุด โดยจะเกิดเป็นสองชั้น คือ ชั้นสารประกอบ (White layer) และชั้นการแพร่ (Diffusion zone) โดยชั้นของการแพร่เกิดจากไนโตรเจนและคาร์บอนไม่ได้ทำปฏิกิริยากับเหล็ก จึงเกิดการละลายในลักษณะสารละลายของแข็ง (Solid Solubility) ช่วยเพิ่มคุณสมบัติการต้านทานความล้า (Fatigue

resistance) ส่วนชั้นผิวแข็ง (White layer or compound layer) เกิดจากการทำปฏิกิริยากับเหล็กเกิดเป็นสารประกอบ เช่น $Fe_{2-3}N$, Fe_4N เป็นต้น ช่วยเพิ่มคุณสมบัติด้านการสึกหรอ



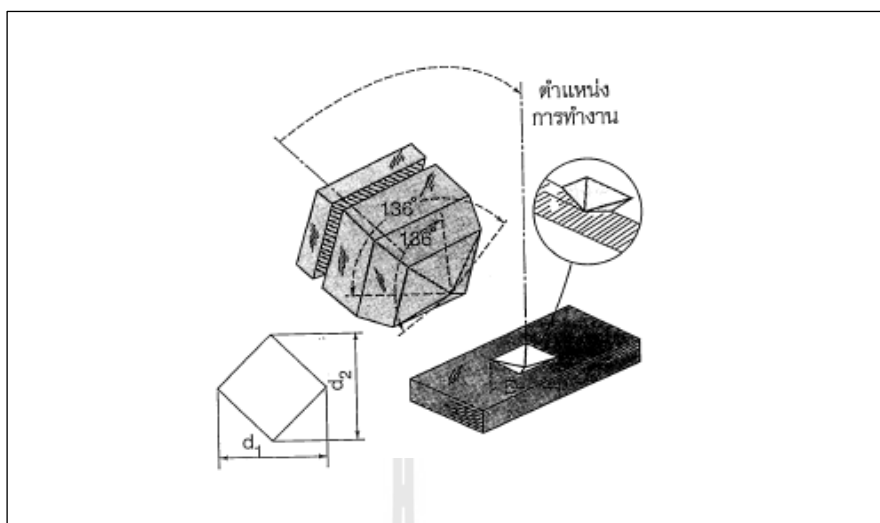
รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะของบริเวณที่เกิดการแทรกซึมไนโตรเจนและโครงสร้างผิวขาว

3.6 การวิเคราะห์ค่าความแข็ง

ความแข็ง (Hardness) เป็นความสามารถของวัสดุในการต้านทานต่อการกด หรือการขีดข่วนที่ผิว เสียหายบริเวณพื้นผิววัสดุ ซึ่งวิธีการทดสอบความแข็งมีหลายวิธีขึ้นกับชนิดของวัสดุและความต้องการในการใช้งาน สำหรับวัสดุวิศวกรรมอาจใช้ความแข็งในหน่วยต่าง ๆ เช่น บริเนลล์ วิกเกอร์ส หรือ ร็อกเวลล์ตามความเหมาะสม เป็นต้น

การตรวจสอบค่าความแข็งผิวของชิ้นงาน จะทำการทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Micro Vickers hardness tester) วัดโดยใช้หัวกดที่ทำจากเพชรเป็นรูปพีระมิดมุม 136 องศา การทดสอบนี้ได้ลักษณะรอยกดค่อนข้างชัดเจน และหัวกดจุดมีลักษณะที่แหลมคม ดังรูปที่ 3.7 จึงทำให้เกิดรอยกดที่ชัดเจนการแสดงผลค่าความแข็งเป็น HV แล้วตามด้วยน้ำหนักกดที่ใช้กดในหน่วยกิโลกรัม วัดรอยกดและนำพื้นที่ผิวรอยกดที่วัดได้ไปหารแรงที่ใช้กดควรกดค้างไว้ที่ขึ้นทดสอบประมาณ 30 วินาที พื้นผิวที่ทดสอบควรจะราบเรียบ, แบน, สะอาด และเป็นแนวระนาบก่อนที่จะทำการทดสอบ การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์สนั้นใช้วัดความแข็งของโลหะทุกชนิด รวมถึงเหล็กกล้าที่ไม่ได้ชุบแข็งและเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็ง โลหะนอกกลุ่มเหล็ก โดยเฉพาะชิ้นงานที่มีความแข็งมาก ๆ และมีความหนาชั้นความแข็งน้อย ๆ

การทดสอบค่าความแข็งขึ้นทดสอบถูกนำมาใช้เพื่อให้ผิวชิ้นงานมีความเรียบผิว โดยนำมาทำการเจียรในผิว เบอร์ 2000 พร้อมจะนำมาตรวจสอบความแข็งผิว การทดสอบใช้เครื่องวัดความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ส (Micro Vickers hardness tester) ซึ่งเป็นเครื่องอัตโนมัติ คำนวณความแข็งให้อยู่ในรูปของตัวเลข การทำงานของเครื่องวัดความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์สมีจุดเด่น คือ หัวกดเพชรที่มีพื้นฐานเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส แรงกระทำที่น้อย หน่วยวัดความแข็งเป็น HV



รูปที่ 3.7 แสดงหลักการทดสอบแบบวิกเกอร์ส

3.7 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมี

การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องมือ Spectrometer นิยมใช้มากสุดในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถเตรียมชิ้นงานได้ง่าย และใช้เวลาในการทดสอบรวดเร็ว Emission spectrometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และหาปริมาณธาตุของโลหะและอโลหะที่เป็นของแข็ง

หลักการทำงานเมื่อทำการ Spark (ชิ้นงานเป็นขั้วลบ, อิเล็กโทรดเป็นขั้วบวก) ธาตุทุกธาตุจะถูกกระตุ้นให้ปล่อยพลังงานคลื่นแสงออกมา เข้าเครื่องผ่านเลนส์รวมแสง ผ่าน Primary Slit เพื่อให้เกิดความคมของแสงบน Grating เพื่อทำการแยกคลื่นแสง คลื่นแสงของธาตุต่างๆ จะเรียงกันตามคุณลักษณะเฉพาะของธาตุนั้นๆ ซึ่งเรียกว่า Wave length หรือ ความยาวคลื่นแสง ทางบริษัทผู้ผลิตจะรู้ได้โดยทฤษฎีทางฟิสิกส์ ว่าธาตุตัวไหนอยู่ที่ตำแหน่งใดก็จะวาง Secondary Slit ไว้ตรงนั้นเพื่อให้ธาตุที่ต้องการผ่านเท่านั้น เมื่อแสงผ่าน Secondary Slit แล้วจะเข้าสู่ Photomultiplier Tube (PMT) หลอด (PMT) มีหน้าที่เปลี่ยนความเข้มของคลื่นแสงเป็นกระแสไฟฟ้า ดังนั้นหลอด PMT จะปล่อยกระแสไฟฟ้าออกมามากน้อยตามความเข้มของแสง

การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงาน โลหะ เป็นส่วนสำคัญในการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นสำหรับการควบคุมมาตรฐานการผลิต การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เครื่องมือคือ Optical emission spectrometer (OES) ของ Thermo Scientific รุ่น ARL 3460 METALS ANALYZER ใช้สำหรับการตรวจสอบและวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมี



รูปที่ 3.8 เครื่อง Optical emission spectrometer รุ่น ARL 3460 METALS ANALYZER

3.8 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

การทดสอบโดยการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกนี้อาศัยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction : XRD) เป็นเทคนิควิเคราะห์วัสดุพื้นฐาน เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึก (Crystal structure) การจัดเรียงตัวของอะตอม โมเลกุลของสารประกอบต่าง ๆ ทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative) โดยอาศัยการเลี้ยวเบน และการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ และความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างผลึก (Crystallography) เครื่องมือชนิดนี้สำคัญมากในการควบคุมคุณภาพการผลิต สำหรับตรวจสอบสมบัติวัสดุ

รังสีเอ็กซ์ (X-ray) จัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูง มีความยาวคลื่นสั้นอยู่ในช่วงระหว่าง 0.01-10 นาโนเมตร อันตริยาของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดกับสารนั้นก่อให้เกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ เช่น เกิดการเปล่งแสง (emission) การดูดกลืน (absorption) การกระเจิง (scattering) การเลี้ยวเบน (diffraction) เป็นต้น สารเหล่านี้มีลักษณะเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด ซึ่งหลักการดังกล่าวนี้เราสามารถนำมาวิเคราะห์สารได้

การตรวจสอบโครงสร้างของโลหะนั้น ใช้เครื่อง XRD (X-ray diffraction) รุ่น D8 Advance ในการทดสอบจะมีการเตรียมสภาพผิวหน้าชิ้นทดสอบในด้านการทดสอบ จากนั้นนำไปวางในอุปกรณ์จับยึด โดยวางผิวด้านที่เตรียมไว้คว่ำลงเพื่อให้ได้ระนาบ นำเข้าเครื่อง ขั้นตอนนี้สามารถกำหนดเวลาในการตรวจวัดความเข้มแสงรังสีการเลี้ยวเบน ข้อมูลตำแหน่งการเลี้ยวเบน และค่าความเข้มสัมพัทธ์ของเส้นการเลี้ยวเบน จากมุม 30-90 องศา และนำไปวิเคราะห์หาค่าด้วยโปรแกรม EVA โดยโปรแกรมนี้สามารถเปรียบเทียบกับรูปแบบของสารประกอบมาตรฐานที่มีอยู่ในฐานข้อมูลได้

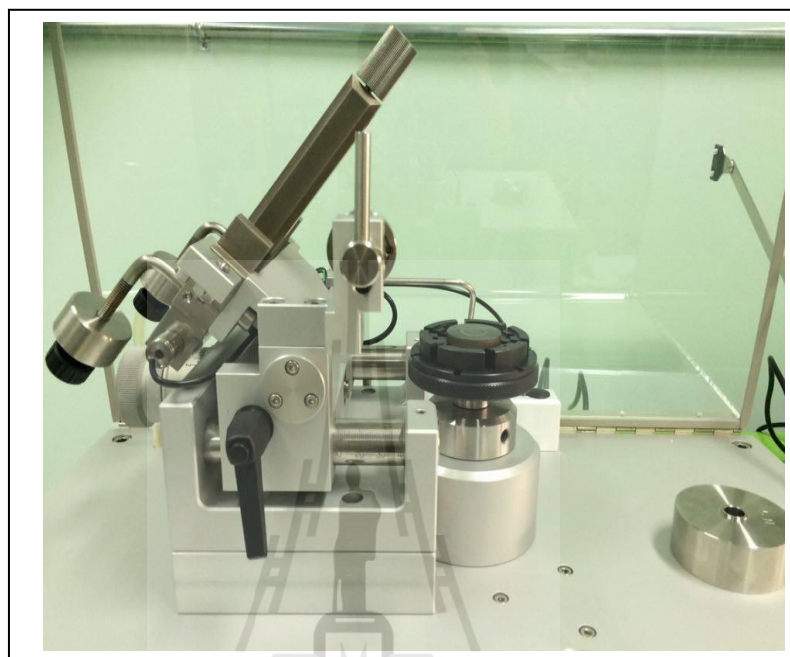


รูปที่ 3.9 เครื่อง X-Ray diffraction รุ่น D8 Advance

3.9 การวิเคราะห์และศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Pin on disc)

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน เลือกใช้การทดสอบจากเครื่องมือทดสอบ pin on disc ใช้ชุดทดสอบสภาวะไร้สารหล่อลื่น ชุดทดสอบแสดงดังภาพที่ 3.9 วิธีการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G 99-05 Standard test method for wear testing with pin-on-disc Apparatus ดำเนินการทดสอบภายใต้อุณหภูมิห้อง 28 ± 2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 60 ± 10 %RH โดยใช้ชิ้นทดสอบแบบหมุด ขนาด 5×16.5 mm (สำหรับชิ้นทดสอบจาก pin on disc ธรรมชาติ) และงานทดสอบ เลือกใช้เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 mm ความหนา 5 mm ในการทดสอบลักษณะของชิ้นทดสอบ เป็นดังภาพที่ 3.9 ก่อนนำไป

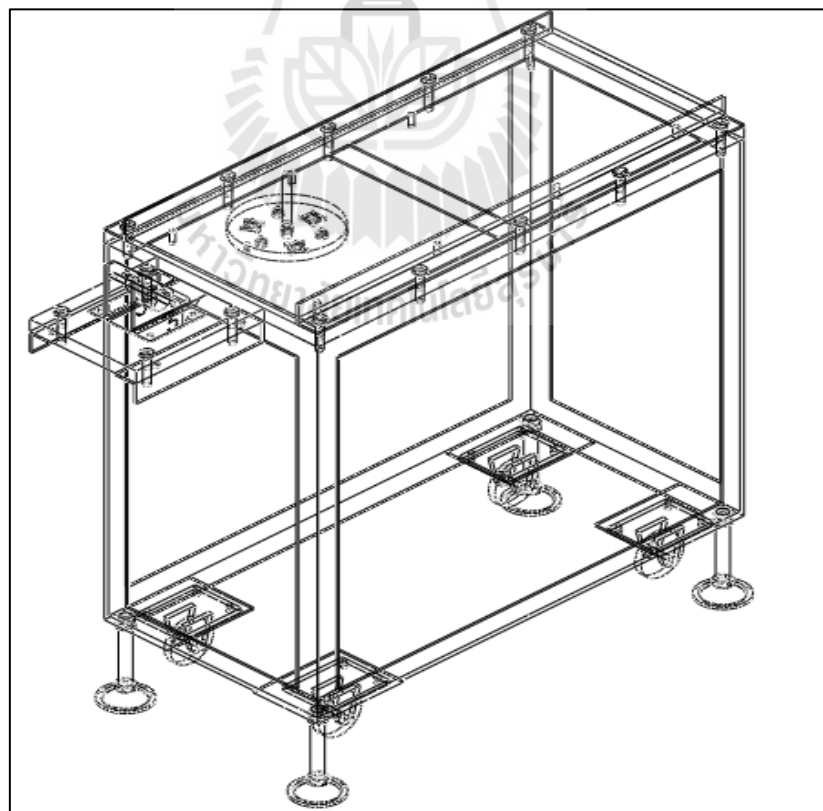
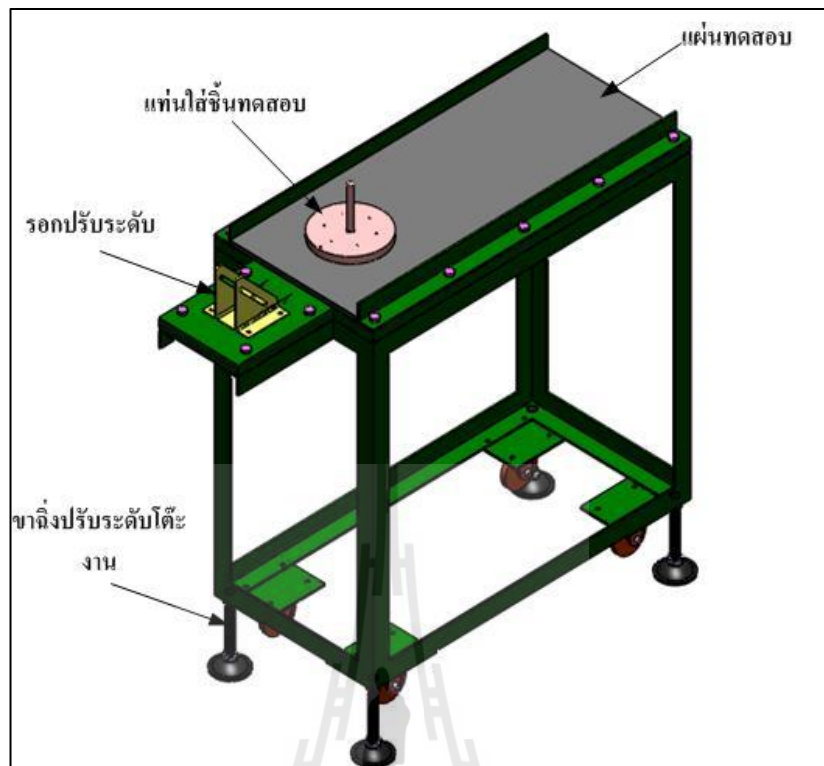
ทดสอบขึ้นทดสอบทั้งสอง ต้องถูกนำไปทดสอบค่าความเรียบผิว ซึ่งให้ได้ค่าความเรียบผิว จากการขีดด้วยกระดาษทรายจนถึงเบอร์ 2000 ดังตารางที่ 3.4 (ข) หลังจากนั้นจะถูกนำไปทดสอบภายใต้เงื่อนไข ภาระโหลด 5 นิวตัน อัตราเร็ว 0.1 m/s ระยะทาง 50 เมตร



รูปที่ 3.10 เครื่องมือทดสอบ pin on disc (เครื่องธรณศาสตร์)

3.10 การวิเคราะห์และศึกษาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากเครื่องที่ประดิษฐ์

การออกแบบเครื่องทดสอบวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ออกแบบตามมาตรฐาน ASTM D1894 -99 Standard test Method for static and kinetic coefficients of friction of plastic film and sheeting ดำเนินการทดสอบแบบไถลในสภาวะไร้สารหล่อลื่น (dry sliding condition) ภายใต้อุณหภูมิห้อง โดยทดสอบแบบภายในอุณหภูมิห้อง 28 ± 2 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 60 ± 10 %RH ใช้ชิ้นทดสอบขนาด 18 X 20 mm เป็นชิ้นทดสอบ แผ่นทดสอบที่ติดตัวเครื่องเหล็กกล้า เครื่องมือเย้น D2 ขนาด 40 X 100 X 1 cm ทดสอบภายใต้ภาระโหลด 400 N อัตราเร็ว 50 mm/min ดังรูปที่ 3.10

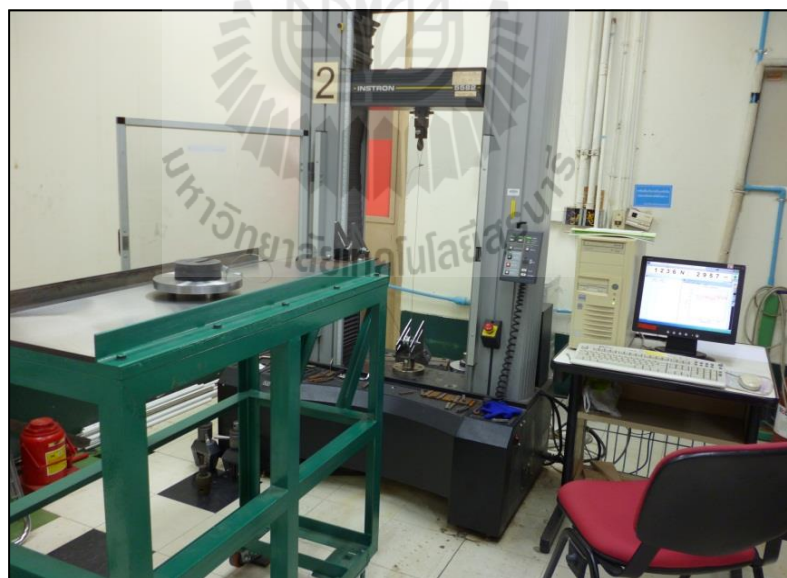


รูปที่ 3.11 เครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน Friction Machine

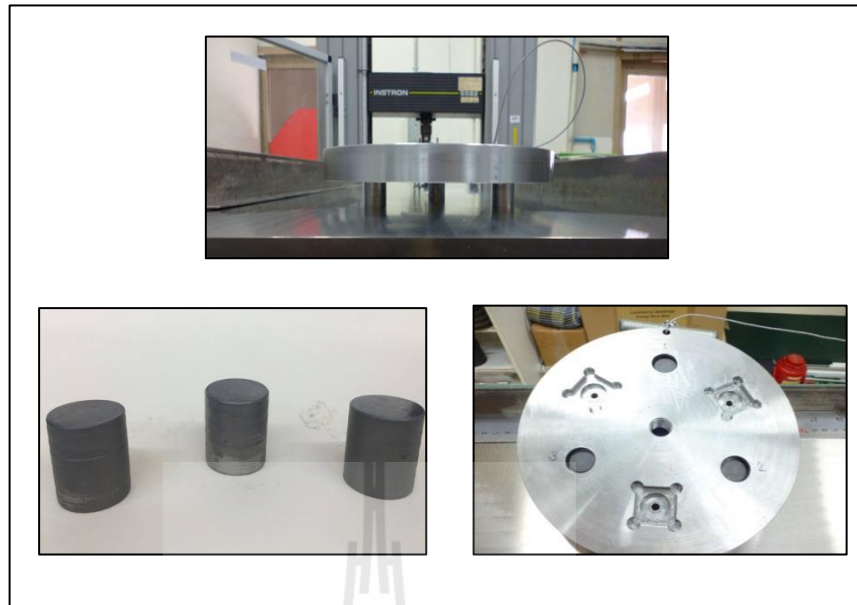
3.10.1 การทดสอบเครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแบบแนวราบ

ขั้นตอนการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีขั้นตอน ดังนี้

1. ตั้งระดับชุดทดสอบโดยการปรับความสูงที่ขาตั้งสี่ ใช้ระดับน้ำวัดจนได้ระดับที่เหมาะสม ดังรูป 3.11
2. ติดตั้งชิ้นงานทดสอบไว้กับแท่นใส่ชิ้นทดสอบ ทั้งหมดสามจุด (รูป 3.13)
3. ร้อยสลิงผ่านชุดรอกสองจุด พร้อมกับปรับระดับรอกให้สลิงตั้งขึ้นอยู่ในแกนขนานกับพื้น
ส่วนเครื่อง UTM ตั้งตั้งฉากกับพื้น ดังรูป 3.13
4. หลังจากการปรับตำแหน่งทั้งหมดเรียบร้อยแล้ววางก้อนน้ำหนักทั้งหมด 400 N บนแท่นใส่ชิ้นทดสอบ ดังรูป 3.14
5. เปิดโปรแกรม Friction จาก Instron ตั้งค่าพารามิเตอร์ กำหนด ความเร็วที่ 50 mm/min และระยะ extension 600 mm จากนั้น ทำการทดลองรันโปรแกรม (รูป 3.15)
6. เก็บค่าการทดสอบ



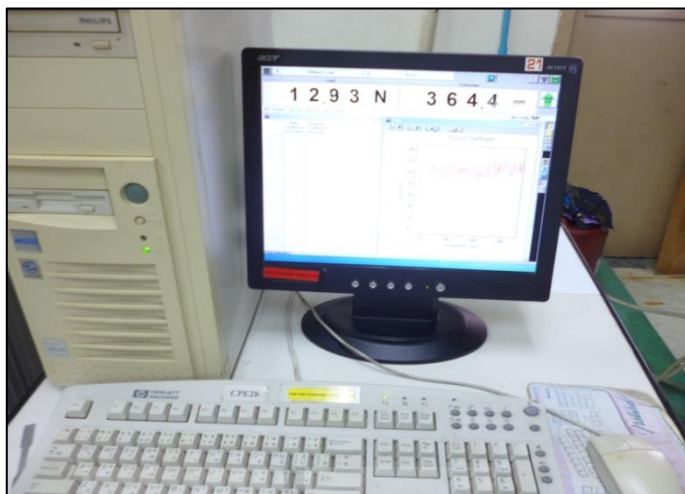
รูปที่ 3.12 แสดงการติดตั้งเครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับ เครื่อง UTM



รูปที่ 3.13 แสดงการติดตั้งเครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับ เครื่อง UTM

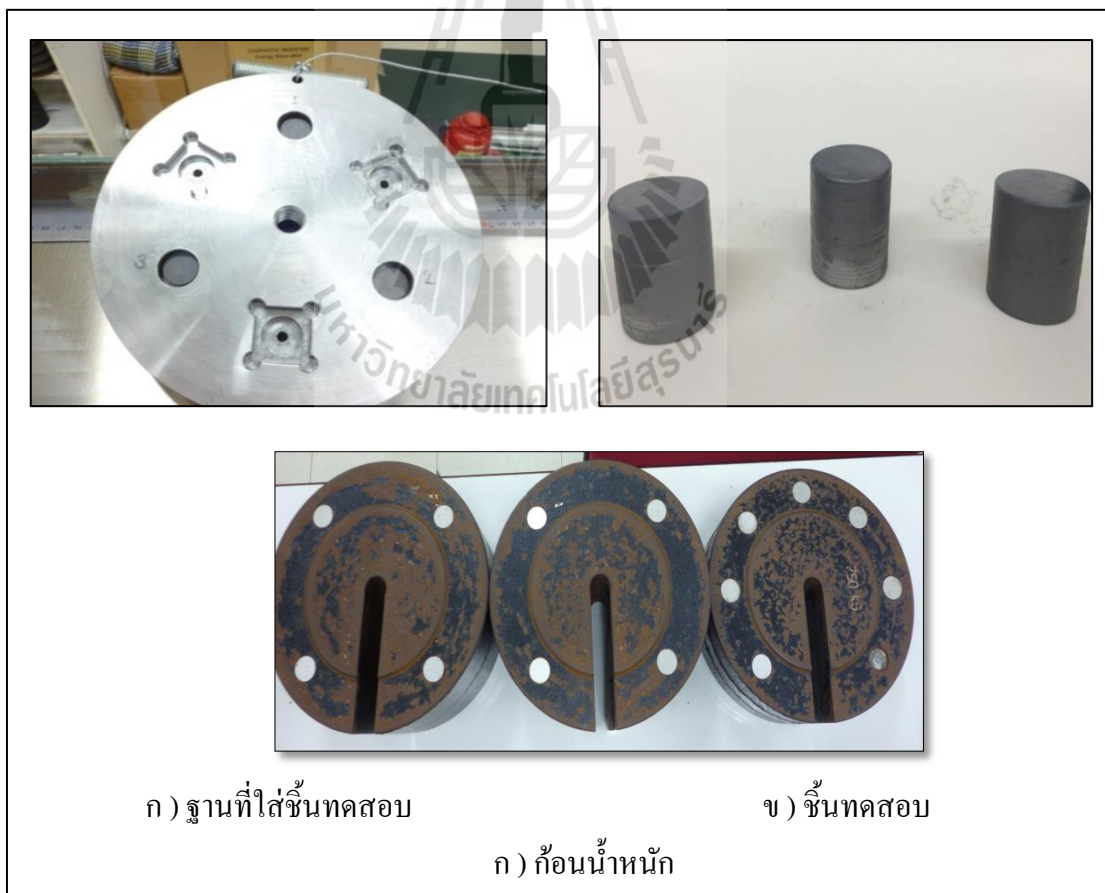


รูปที่ 3.14 แสดงการติดตั้งเครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับ เครื่อง UTM โดยการใส่ก้อนน้ำหนักถ่วง



รูปที่ 3.15 แสดงโปรแกรม Friction จาก instron เครื่อง Universal Testing Machine

3.10.2 อุปกรณ์เครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

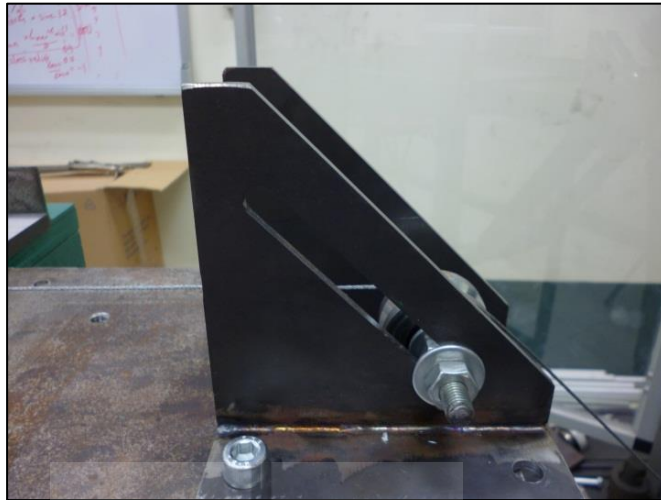


ก) ฐานที่ใส่ชิ้นทดสอบ

ข) ชิ้นทดสอบ

ค) ก้อนน้ำหนัก

รูปที่ 3.16 ชุดอุปกรณ์ประกอบฐานที่ใส่ชิ้นทดสอบในระหว่างทำการทดสอบ



รูปที่ 3.17 รอกที่ใช้ติดตั้งกับตัวเครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน



รูปที่ 3.18 รอกที่ใช้ติดตั้งกับตัวเครื่อง UTM

3.11 การวิเคราะห์ห้อยที่เกิดจากการสึกหรอ

การศึกษารอยที่เกิดจากการสึกหรอในงานวิจัยนี้ ทดสอบโดย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน SEM (Scanning electron microscope) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนใช้แหล่งกำเนิดคลื่นอิเล็กตรอน หลักการทำงานของเครื่อง แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนจะทำหน้าที่กำเนิดอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยจะถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านและถูกรวบรวมเข้าที่เลนส์รวบรวมรังสีเพื่อให้กลุ่มอิเล็กตรอน กลายเป็นลำอิเล็กตรอน หลังจากนั้นเลนส์อิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโดยเลนส์ใกล้วัตถุ ลงบนผิวชิ้นทดสอบเพื่อทำการศึกษาต่อไป

จากงานวิจัยนี้ได้ทำการสำรวจลักษณะผิวของชิ้นทดสอบทั้งก่อนและหลังการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและการสึกหรอ



รูปที่ 3.19 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน SEM

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 กล่าวนำ

จากการทดลองและผลการดำเนินการวิจัยในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาผลกระทบของกระบวนการแก๊สซอพต์ไนตรายดิง และแก๊สซัลเฟอร์ไนตรายดิง ต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของ ชิ้นทดสอบ ซึ่งเป็นเหล็กทั้งหมด 5 ชนิด ดังนี้ AISI 1010, AISI 1020, AISI 1040, AISI 4140, AISI 4340 โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

- กลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน คือ AISI 1010, AISI 1020, AISI 1040

- กลุ่มเหล็กกล้าผสม คือ AISI 1040, AISI 4140, AISI 4340

จากนั้นชิ้นงานจะถูกนำไปปรับปรุง โครงสร้างก่อนการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการอบปกติและทำความสะอาดผิวจากและทำการเตรียมผิวก่อนการชุบแข็งผิว

สำหรับการดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือการศึกษาผลกระทบของความเรียบผิวของชิ้นทดสอบก่อนการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซอพต์ไนตรายดิงและแก๊สซัลเฟอร์ไนตรายดิง จากนั้น ส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาสัมประสิทธิ์ความเสียหายของเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการแก๊สซอพต์ไนตรายดิงและ แก๊สซัลเฟอร์ไนตรายดิง โดยแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อหลัก

1. การศึกษาผลกระทบของความเรียบผิวของชิ้นทดสอบก่อนการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซอพต์ไนตรายดิงและแก๊สซัลเฟอร์ไนตรายดิง โดยการเตรียมผิว 3 ลักษณะ (เนื่องจากการเตรียมผิวแบบ การขัดด้วยอะลูมินาไม่เกิดชั้นผิวขาวจึงไม่ได้นำมาพิจารณา)

- ผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมี
- ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก
- ผลการทดสอบความแข็งผิว
- ผลการวิเคราะห์ความหนาชั้นผิวขาว

2. การศึกษาสัมประสิทธิ์ความเสียหายของเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการ แก๊สซอพต์ไนตรายดิงและแก๊สซัลเฟอร์ไนตรายดิง

- ผลกระทบของเหล็กกล้าคาร์บอน ต่อกระบวนการชุบแข็ง
- ผลกระทบของเหล็กกล้าผสม ต่อกระบวนการชุบแข็ง
- ผลการหาสหสัมพันธ์

4.2 ผลจากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมี

ผลการวิเคราะห์ชิ้นทดสอบก่อนการนำไปปรับปรุงและชุบแข็งผิวด้วยแก๊สของเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าตามมาตรฐาน (%wt, Balance Fe)

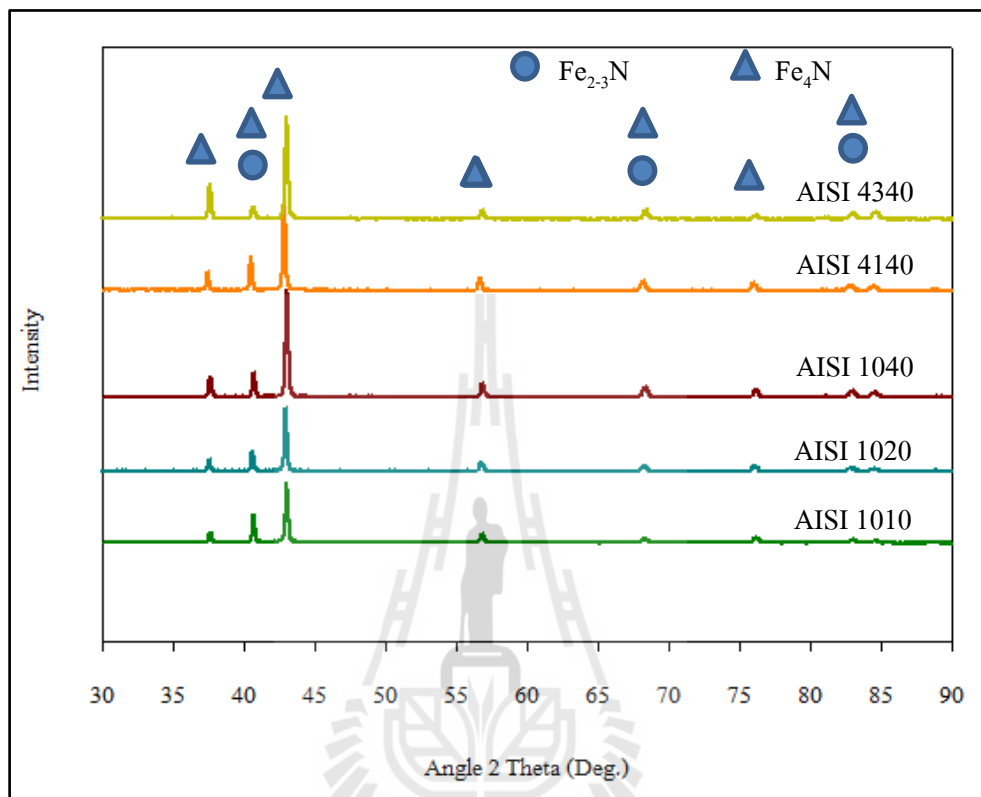
Materials	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	V	Fe
AISI 1010	0.08-0.13	-	0.30-0.60	≤0.040	≤0.040	-	-	-	-	-	-	Bal.
AISI 1020	0.18-0.23	-	0.30-0.60	≤0.040	≤0.040	-	-	-	-	-	-	Bal.
AISI 1040	0.36-0.44	-	0.60-0.90	≤0.040	≤0.040	-	-	-	-	-	-	Bal.
AISI 4140	0.38-0.43	0.15-0.3	0.75-1.00	≤0.035	≤0.040	0.80-1.10	0.15-0.20	-	-	-	-	Bal.
AISI 4340	0.38-0.43	0.15-0.3	0.60-0.80	≤0.035	≤0.040	0.70-0.90	0.20-0.30	1.65-2.00	-	-	-	Bal.

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า (%wt, Balance Fe)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	V	Fe
AISI 1010	0.1434	0.2411	0.4387	0.01263	0.01244	0.0485	0.00163	0.01853	0.02481	0.01782	0.00131	Bal.
AISI 1020	0.2383	0.2222	0.3754	0.022	0.01416	0.3122	0.00192	0.01201	0.01777	0.02692	0.0018	Bal.
AISI 1040	0.4292	0.2378	0.6617	0.02171	0.00361	0.1079	0.01151	0.04592	0.00631	0.2152	0.00162	Bal.
AISI 4140	0.4171	0.2222	0.7127	0.0275	0.00532	1.098	0.16121	0.03901	0.02015	0.1674	0.00748	Bal.
AISI 4340	0.4057	0.2321	0.6614	0.0182	0.00584	0.8926	0.2718	1.7166	0.03621	0.02534	0.00274	Bal.

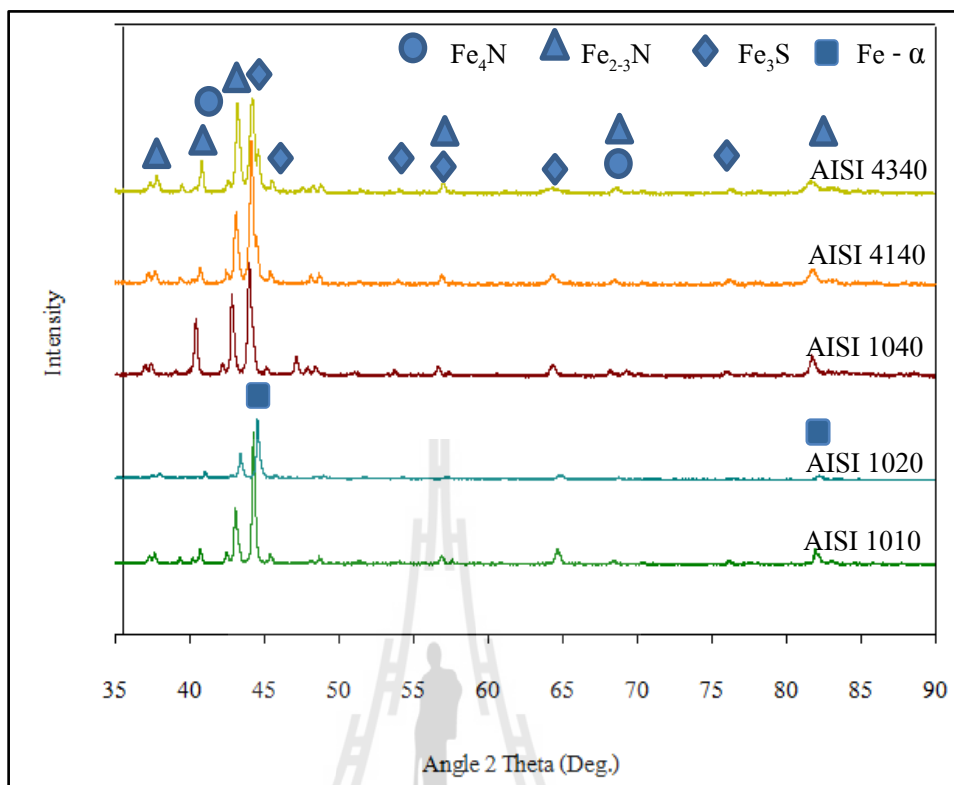
จากผลการทดสอบ วิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้า ที่นำมาใช้ทำชิ้นทดสอบ โดยการตรวจสอบด้วยเครื่อง Optical Emission Spectrometer (OES) เปรียบเทียบกับส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าตามมาตรฐานของสถาบันเหล็กกล้าสหรัฐอเมริกา (ตารางที่ 4.1) พบว่า เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมทั้ง 5 ชนิด มีส่วนผสมองค์ประกอบทางเคมี เป็นไปตามมาตรฐานของสถาบันเหล็กกล้า โดยทั้งปริมาณคาร์บอนและส่วนธาตุผสมอื่น ๆ อยู่ในช่วงที่กำหนด ดังแสดงในตารางที่ 4.2

4.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลการตรวจสอบการวิเคราะห์ด้วย XRD ด้วยกระบวนการแก๊ส
แก๊สซอพต์ไนตรายดิง

จากรูปที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ด้วยกระบวนการแก๊สซอพต์ไนตรายดิง พบว่า ส่วนของธาตุสารประกอบที่เกิดขึ้น เหมือนกันต่อเหล็กทั้ง 5 ชนิด โดยสารประกอบที่เกิดขึ้น คือ สารประกอบไนโตรเจน ดังนี้ Fe₄N (γ') และ Fe₂₋₃N (ε) ซึ่งเป็นโครงสร้างของชั้นผิวสารประกอบชั้นงาน เรียกว่า (White layer) ในส่วนนี้จะมีความเปราะ และแข็ง



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการตรวจสอบการวิเคราะห์ด้วย XRD ด้วยกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ไนโตรเจน

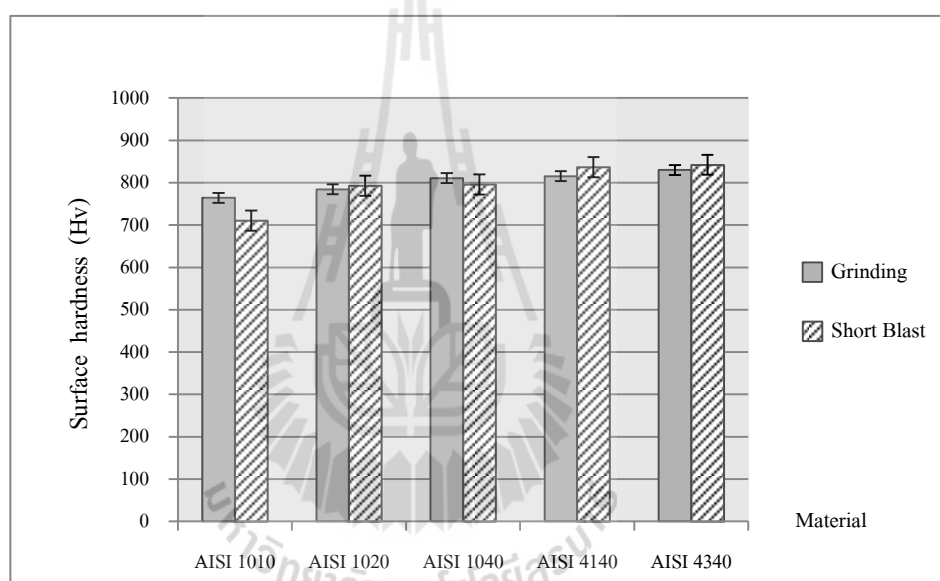
จากรูปที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ด้วยกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ไนโตรเจน พบว่า ส่วนของธาตุสารประกอบที่เกิดขึ้นสารประกอบที่เกิดขึ้นในเหล็ก คือ สารประกอบไนโตรเจน ดังนี้ Fe_4N (γ') และ $Fe_{2-3}N$ (ϵ) ซึ่งเป็นโครงสร้างของชั้นสารประกอบชั้นงาน เรียกว่า (White layer) ในส่วนนี้จะมีความเปราะ และแข็ง และมีชั้นของสารประกอบ Fe_3S เกิดขึ้นในชั้นผิวอีกด้วย ยกเว้นในเหล็ก AISI 1020 ซึ่งพบ โครงสร้างเหล็กแอลฟา (α) หรือเหล็กเฟอร์ไรต์ (Ferrite) มีการวางตัวของอะตอมแบบ BCC (Body Centered Cubic) เกิดขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะของพื้นผิวชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ไนโตรเจน พบลักษณะการหลุดลอกของชั้นฟิล์มเคลือบผิว (peel off) Julino AVElar Araujo, [2010] ซึ่งมีงานวิจัยก่อนหน้านี้ค้นพบลักษณะเช่นนี้มาแล้ว ทำให้เปิดเผยถึงชั้นผิวหน้าของชั้นทดสอบที่ผ่านการอบปกติ

4.4 ผลจากการวิเคราะห์ค่าความแข็ง

ผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งผิวจากการเตรียมพื้นผิว 2 ลักษณะ

- ชั้นทดสอบผ่านการพ่นทำความสะอาดด้วย เม็ดโลหะแบบบอลลขนาด 0.3 มม.
- ชั้นทดสอบผ่านการพ่นทำความสะอาดด้วย เม็ดโลหะแบบบอลลขนาด 0.3 มม. และขัดด้วยกระดาษทราย เบอร์ 2000

4.4.1 พิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งผิวโดยการเตรียมผิวที่แตกต่างกันในชั้นทดสอบทั้ง 5 ชนิด กระบวนการแก๊สซอพต์ในทรายดิ่ง



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Surface hardness กับ ประเภทของชั้นทดสอบในกระบวนการแก๊สซอพต์ในทรายดิ่ง

พิจารณาจากรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งผิว (Surface hardness) ชั้นทดสอบกับชั้นทดสอบเหล็กกล้าที่ผ่านการเตรียมผิวมาแตกต่างกันทำการหุบแข็งด้วยกระบวนการแก๊สซอพต์ในทรายดิ่ง พบว่าการเตรียมผิวชั้นทดสอบที่ต่างกันไม่ทำให้ค่าความแข็งผิวเปลี่ยนแปลงไปโดยค่าความแข็งผิวใกล้เคียงกันในทุกชั้นทดสอบ ขณะที่พบว่าค่าความแข็งผิวสูงนั้นจะอยู่ที่เหล็กกล้าผสมยี่นยันจากการวิเคราะห์ทางสถิติ ด้วย two-way ANOVA โดยตั้งสมมุติฐานหลัก (H_0) ให้ค่าเฉลี่ยของความแข็งผิวของชั้นทดสอบต่างชนิดกัน และจากการเตรียมผิวที่ต่างกัน มีค่าความแข็งผิวไม่แตกต่างกัน ใช้การเปรียบเทียบค่า P-value ที่ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05

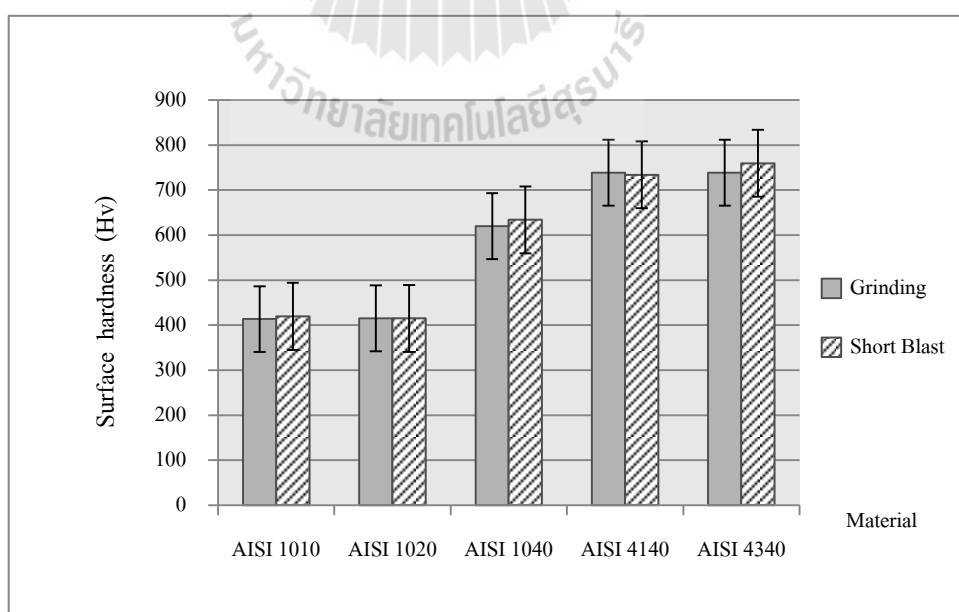
ตารางที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Surface hardness กับ ประเภทของชั้นทดสอบในกระบวนการแก๊สซอฟต์ในทรายดิ่ง

Two-way ANOVA :hardness versus Material, Surface roughness					
Source	DF	SS	MS	F	P
Material	4	12086.8	3021.69	6.60	0.047
Surface Roughness	1	70.1	70.07	0.15	0.716
Error	4	1830.9	457.72		
Total	9	13987.7			

S = 21.39 R-Sq = 86.91 % R-Sq (adj) = 70.55 %

ผลดังตารางที่ 4.3 หาก P-value มากกว่า 0.05 จะยอมรับสมมุติฐานหลัก (H_0) จากการทดสอบทางสถิติพบว่าที่ปัจจัยชั้นทดสอบเหล็กกล้าต่างชนิดกันให้ค่า P-value เท่ากับ 0.047 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ชั้นทดสอบเหล็กกล้าต่างชนิดกันนั้นมีผลต่อค่าความแข็งผิว ในขณะที่ปัจจัยความหยาบผิวที่ต่างกันนั้น มีค่า P-value เท่ากับ 0.716 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการเตรียมผิวชั้นทดสอบโดยให้ค่าความหยาบผิวที่ต่างกันนั้น ไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งผิวชั้นทดสอบ

4.4.2 พิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งผิวโดยการเตรียมผิวที่แตกต่างกันในชั้นทดสอบทั้ง 5 ชนิด กระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิ่ง



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Surface hardness กับ ประเภทของชั้นทดสอบในกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิ่ง

จากรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งผิว (Surface hardness) ซึ่งทดสอบกับซึ่งทดสอบเหล็กกล้าที่ผ่านการเตรียมผิวมาแตกต่างกันทำการชุบแข็งด้วยกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ไนตรายดิง จากกราฟรูปที่ 4.4 แนวโน้มไปในทางเดียวกันกับกระบวนการแก๊สซอฟต์ไนตรายดิง พบว่าการเตรียมผิวซึ่งทดสอบที่แตกต่างกันไม่ทำให้ค่าความแข็งผิวเปลี่ยนแปลงไป โดยค่าความแข็งผิวใกล้เคียงกันในทุกคู่ซึ่งทดสอบ และพบว่าที่ค่าความแข็งผิวสูงจะอยู่ที่เหล็กกล้าผสม

ยืนยันผลด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติ Two-way ANOVA โดยตั้งสมมุติฐานหลัก (H_0) ให้ค่าเฉลี่ยความแข็งผิวของซึ่งทดสอบต่างชนิดกัน และจากการเตรียมผิวที่ต่างกัน มีค่าความแข็งผิวไม่แตกต่างกันและใช้การเปรียบเทียบค่า P-value ที่ได้จากการวิเคราะห์ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 หาก P-value มากกว่า จะยอมรับสมมุติฐานหลัก (H_0) พิจารณาในสองปัจจัย พบว่าปัจจัยซึ่งทดสอบเหล็กกล้าต่างชนิดกันให้ค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ซึ่งทดสอบเหล็กกล้าต่างชนิดกันนั้นมีผลต่อค่าความแข็งผิว ในขณะที่ปัจจัยความหยาบผิวที่แตกต่างกันนั้นมีค่า P-value เท่ากับ 0.716 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการเตรียมผิวซึ่งทดสอบโดยให้ค่าความหยาบผิวที่ต่างกันนั้นไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งผิวซึ่งทดสอบ ดังตารางที่ 4.4 ดังนั้นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความแข็งผิว จึงเป็นประเภทของซึ่งทดสอบเหล็กกล้าที่ต่างชนิดกัน ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับกระบวนการแก๊สซอฟต์ไนตรายดิง

สรุปจาก 4.4.1 และ 4.4.2 พบว่าเหล็กกล้าต่างชนิดกันมีผลต่อค่าความแข็งผิว ในขณะที่การเตรียมผิวที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งผิวซึ่งทดสอบ โดยเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1010, AISI 1020 มีค่าความแข็งผิวต่ำกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1040 และเหล็กกล้าผสม AISI 4140, AISI 4340 ทั้งสองกระบวนการอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้จะชี้ไปถึงโครงสร้างหลังจากการทำอบปกติ (Normalizing) ในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ที่มีปริมาณโครงสร้างเพิร์ลไลท์ (Pearlite) น้อยกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางและมีปริมาณโครงสร้างเฟอร์ไรท์ (Ferrite) ที่มากกว่า ทำให้ค่าความแข็งผิวเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางมีความแข็งสูงกว่า ในขณะที่เหล็กกล้าผสมมีปริมาณเพอร์ไลท์ (Pearlite) และเฟอร์ไรท์ (Ferrite) ปริมาณเท่า ๆ กันและมีเกรนที่ละเอียด พร้อมทั้งพบโครงสร้างชั้นผิวขาว ($Fe_{2-3}N$) ในโครงสร้างของเหล็กกล้าผสม ซึ่งมีความแข็ง จึงส่งผลให้เหล็กกล้าผสมมีความแข็งผิวที่สูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งให้ผลไปในทางเดียวกันทั้งสองกระบวนการ

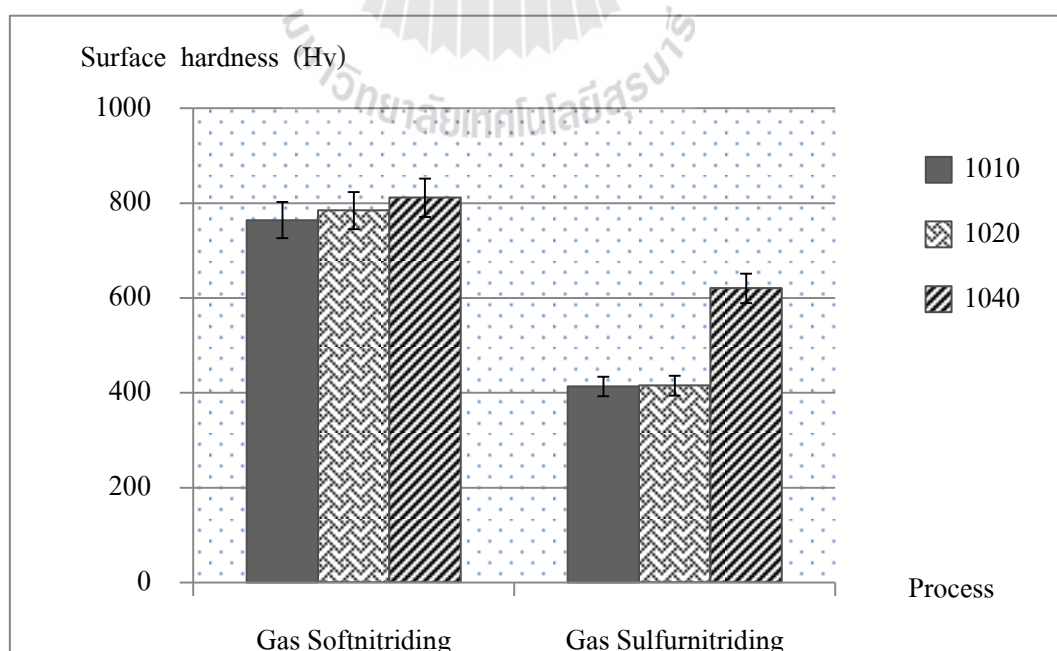
ตารางที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Surface hardness กับ ประเภทของชั้นทดสอบในการแก๊สซัลเฟอร์ไนตรายดิง

Two-way ANOVA :hardness versus Material, Surface roughness					
Source	DF	SS	MS	F	P
Material	4	217793	54448.2	1003.21	0.000
Surface Roughness	1	128	70.07	0.15	0.716
Error	4	217	457.72		
Total	9	218138			

S = 7.367 R-Sq = 99.90 % R-Sq (adj) = 99.78 %

จากการทดสอบ ตารางที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งผิว คือประเภทของชั้นทดสอบเหล็กกล้าต่างชนิดกัน ดังนั้นจึงได้นำมาพิจารณาในขั้นตอนต่อไปโดยแบ่งประเภทของชั้นทดสอบเหล็กกล้า ออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน และ กลุ่มเหล็กกล้าผสม จึงได้นำมาวิเคราะห์ต่อ ได้ผลดังต่อไปนี้

4.4.3 พิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งผิวในเหล็กกล้าคาร์บอน (ปริมาณคาร์บอนแตกต่างกัน) ในกระบวนการชุบแข็งต่างกัน



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ Surface hardness ในกระบวนการอบชุบต่าง ๆ กลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน

4.4.3.1 กระบวนการแก๊สซอพต์ในทรายดิง

ตารางที่ 4.5 แสดงผล One-way ANOVA : Surface hardness ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซอพต์ในทรายดิง

One-way ANOVA :hardness versus Material					
Source	DF	SS	MS	F	P
Material	2	1609	804	2.83	0.136
Error	6	1703	284		
Total	8	3312			

S = 16.85 R-Sq = 48.57 % R-Sq (adj) = 31.43 %

พิจารณา จากรูปที่ 4.5 สามารถบอกได้ว่าค่าความแข็งผิวกระบวนการแก๊สซอพต์ในทรายดิงมีค่ามากกว่ากระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง ทั้งนี้จากผลการวิเคราะห์สภาพผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) รูปที่ 4.19 พบว่าสภาพผิวหน้าชั้นทดสอบในกระบวนการแก๊สซอพต์ในทรายดิงมีการเคลือบผิวเป็นเนื้อฟิล์มค่อนข้างสมบูรณ์กว่ากระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิงซึ่งเกิดการหลุดลอกของชั้นเคลือบผิว ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเนื่องจากในกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง มีการสร้างปริมาณชั้นผิวขาว(White layer)อยู่ภายใต้บริเวณชั้นสารประกอบซัลไฟด์ มีปริมาณน้อย ทำให้บริเวณผิวหน้าของชั้นสารประกอบซัลไฟด์มีการเปิดออกของชั้นผิวออกได้ (Juliano Avelar Araujo,2010) ทำให้ความหนาแน่นในบริเวณนั้นลดลงพร้อมด้วยค่าความแข็งผิวที่น้อยลงเช่นกัน ในขณะที่กระบวนการแก๊สซอพต์ในทรายดิงสามารถเกิดโครงสร้างชั้นผิวขาวได้ค่อนข้างสมบูรณ์และสม่ำเสมอ

เมื่อนำมาพิจารณาเฉพาะในส่วนของเหล็กกล้าคาร์บอน (ปริมาณคาร์บอนต่างกัน) ในกระบวนการแก๊สซอพต์ในทรายดิงวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือทางสถิติ One-way ANOVA ตามตารางที่ 4.5 โดยตั้งสมมุติฐานหลัก (H_0) ให้ค่าเฉลี่ยความแข็งผิวของชั้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่างชนิดกัน มีค่าความแข็งผิวไม่แตกต่างกันและใช้การเปรียบเทียบค่า P-value ที่ได้จากการวิเคราะห์ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 หาก P-value มากกว่า ระดับนัยสำคัญ (α) จะยอมรับสมมุติฐานหลัก (H_0) และจากผลการทดสอบพบว่า ค่า P-value ของชั้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่างชนิดกัน เท่ากับ 0.136 นั้นแสดงว่า ในกระบวนการชุบแข็งผิวแก๊สซอพต์ในทรายดิง ชั้นทดสอบเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนต่างชนิดกัน ไม่ทำให้ค่าความแข็งผิวแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญ

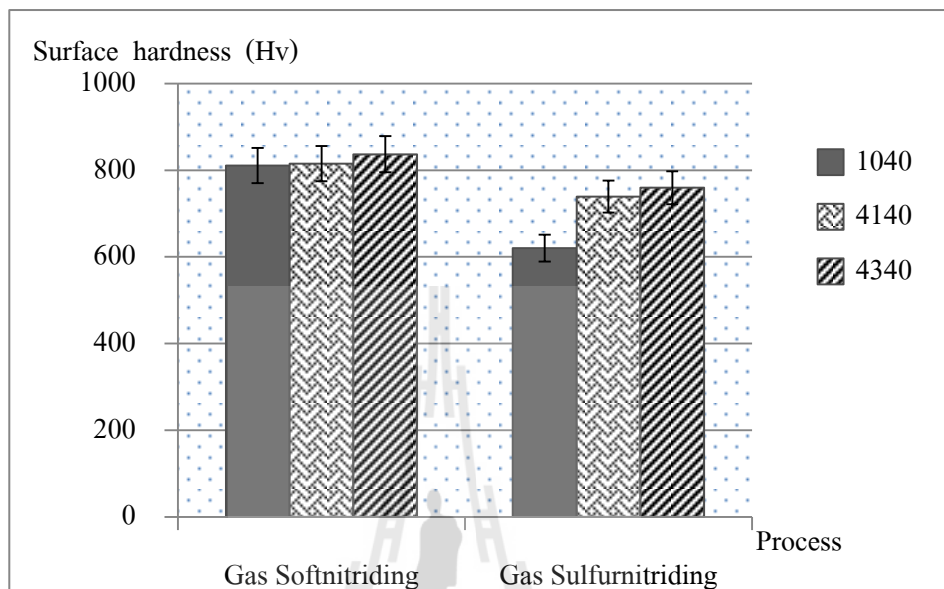
4.4.3.2 กระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง

ตารางที่ 4.6 แสดงผล One-way ANOVA : Surface hardness ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง

One-way ANOVA :hardness versus Material					
Source	DF	SS	MS	F	P
Material	2	68327	34163	130.95	0.000
Error	6	1565	261		
Total	8	69892			
S = 16.15 R-Sq = 97.76 % R-Sq (adj) = 97.01 %					

เมื่อนำมาพิจารณาเฉพาะในส่วนของเหล็กกล้าคาร์บอน (ปริมาณคาร์บอนต่างกัน) ในกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิงวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือทางสถิติ One-way ANOVA ตามตารางที่ 4.6 โดยตั้งสมมุติฐานหลัก (H_0) ให้ค่าเฉลี่ยความแข็งผิวของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่างชนิดกัน มีค่าความแข็งผิวไม่แตกต่างกันและใช้การเปรียบเทียบค่า P-value ที่ได้จากการวิเคราะห์ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 หาก P-value มากกว่า ระดับนัยสำคัญ (α) จะยอมรับสมมุติฐานหลัก (H_0) และจากผลการทดสอบพบว่า ค่า P-value ของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่างชนิดกัน เท่ากับ 0.000 นั้นแสดงว่า ในกระบวนการชุบแข็งผิวแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง ชิ้นทดสอบเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนต่างชนิดกัน ทำให้ค่าความแข็งผิวแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญ

4.4.4 พิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งผิวในเหล็กกล้าผสม (ปริมาณส่วนผสมต่างกัน) กระบวนการชุบแข็งต่างกัน



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ Surface hardness ที่ผ่านกระบวนการอบชุบต่าง ๆ กลุ่มเหล็กกล้าผสม

4.4.4.1 กระบวนการแก๊สซอฟต์ไนไตรดิง

ตารางที่ 4.7 แสดงผล One-way ANOVA : Surface hardness ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซอฟต์ไนไตรดิง

One-way ANOVA :hardness versus Material					
Source	DF	SS	MS	F	P
Material	2	1551	775	2.58	0.155
Error	6	1803	301		
Total	8	3354			

S = 17.34 R-Sq = 46.24 % R-Sq (adj) = 28.32 %

พิจารณาจากรูปที่ 4.6 พบว่าค่าความแข็งผิวกระบวนการแก๊สซอฟต์ไนไตรดิงมีค่ามากกว่ากระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ไนไตรดิง ทั้งนี้ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกันกับกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนดังนี้

จากผลการวิเคราะห์สภาพผิวหน้ากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) รูปที่4.19 พบว่าสภาพผิวหน้าชั้นทดสอบในกระบวนการแก๊สซอพต์ในทรายดิงมีการเคลือบผิวเป็นเนื้อฟิล์มค่อนข้างสมบูรณ์กว่ากระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง เนื่องจากในกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง มีปริมาณชั้นผิวขาว(White layer)อยู่ภายใต้บริเวณชั้นสารประกอบซัลไฟด์ มีปริมาณน้อย ทำให้บริเวณผิวหน้าของชั้นสารประกอบซัลไฟด์มีการเปิดออกของชั้นผิวออกได้ (Juliano Avelar Araujo,2010) ทำให้ความหนาแน่นในบริเวณนั้นลดลงพร้อมด้วยค่าความแข็งผิวที่น้อยลงเช่นกัน

เมื่อนำมาพิจารณาเฉพาะในส่วนของเหล็กกล้าผสม (ปริมาณคาร์บอนเท่ากัน) ในกระบวนการแก๊สซอพต์ในทรายดิงวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือทางสถิติ One-way ANOVA ตามตารางที่ 4.7 โดยตั้งสมมุติฐานหลัก (H_0) ให้ค่าเฉลี่ยความแข็งผิวของชั้นทดสอบเหล็กกล้าผสมที่มีธาตุผสมต่างชนิดกัน มีค่าความแข็งผิวไม่แตกต่างกันและใช้การเปรียบเทียบค่า P-value ที่ได้จากการวิเคราะห์ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 หาก P-value มากกว่า ระดับนัยสำคัญ (α) จะยอมรับสมมุติฐานหลัก (H_0) และจากผลการทดสอบพบว่า ค่า P-value ของชั้นทดสอบเหล็กกล้าผสมที่มีธาตุผสมต่างชนิดกัน เท่ากับ 0.155 นั้นแสดงว่า ในกระบวนการชุบแข็งผิวแก๊สซอพต์ในทรายดิง ชั้นทดสอบเหล็กกล้าผสมที่มีธาตุผสมต่างชนิดกัน ไม่ทำให้ค่าความแข็งผิวแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญ

4.4.4.2 กระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง

ตารางที่ 4.8 แสดงผล One-way ANOVA : Surface hardness ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง

One-way ANOVA :hardness versus Material					
Source	DF	SS	MS	F	P
Material	2	51457	25728	54.72	0.000
Error	6	2821	470		
Total	8	54278			
S = 21.68 R-Sq = 94.80 % R-Sq (adj) = 93.07 %					

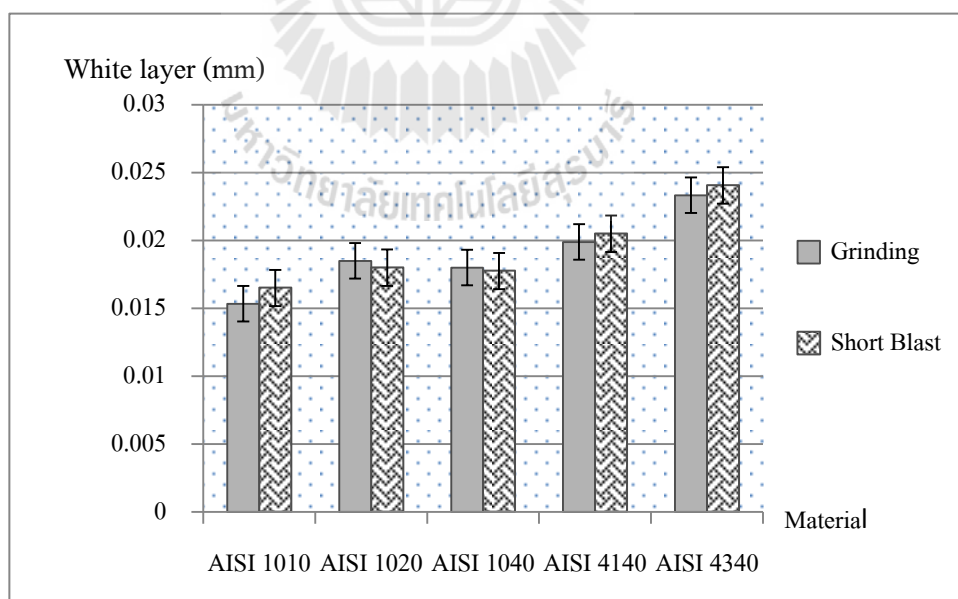
เมื่อนำมาพิจารณาเฉพาะในส่วนของเหล็กกล้าผสม (ปริมาณคาร์บอนเท่ากัน) ในกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิงวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือทางสถิติ One-way ANOVA ตามตารางที่4.8 โดยตั้งสมมุติฐานหลัก (H_0) ให้ค่าเฉลี่ยความแข็งผิวของชั้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่างชนิดกัน มีค่าความแข็งผิวไม่แตกต่างกันและใช้การเปรียบเทียบค่า P-value ที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติ

ที่ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 หาก P-value มากกว่า ระดับนัยสำคัญ (α) จะยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) และจากผลการทดสอบพบว่า ค่า P-value ของชั้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่างชนิดกัน เท่ากับ 0.000 นั้นแสดงว่า ในกระบวนการชุบแข็งผิวแก๊สซัลเฟอร์ไนด์ในทรายดีง ชั้นทดสอบเหล็กกล้าผสม(ปริมาณคาร์บอนเท่ากัน) ทำให้ค่าความแข็งผิวแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญ พิจารณาจากรูปที่ 4.6 พบว่าค่าความแข็งผิวในเหล็กกล้าผสม AISI 4140, AISI 4340 มีความแข็งผิวมากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1040 เนื่องจากในเหล็กกล้าผสม AISI 4340 มีบทบาทของธาตุโมลิบดีนัม โครเมียม นิกเกิลเข้ามาช่วยในการชุบแข็งและเพิ่มความแข็งผิว ในขณะที่เหล็กกล้าผสม AISI 4140 มีโครเมียม และ โมลิบดีนัม

4.5 ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างชั้นผิวขาว

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างชั้นผิวขาวจากการเตรียมผิวชิ้นงาน ทั้ง 2 ลักษณะ ตามที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้น

4.5.1 พิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนาชั้นผิวขาวโดยการเตรียมผิวที่แตกต่างกันในชั้นทดสอบทั้ง 5 ชนิด กระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ไนด์ในทรายดีง



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ White layer และประเภทของชั้นทดสอบ กระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ไนด์ในทรายดีง

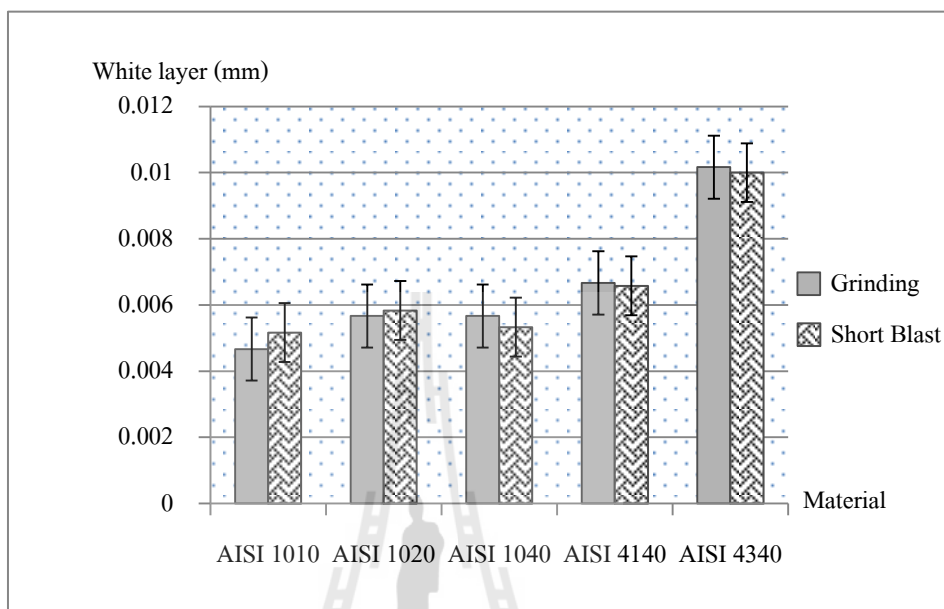
พิจารณาจากรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นผิวขาว (White Layer) ซึ่งทดสอบกับชั้นทดสอบเหล็กกล้าที่ผ่านการเตรียมผิวมาแตกต่างกันทำการชุบแข็งด้วยกระบวนการแก๊สซอพท์ในตารางดัง พบว่าการเตรียมผิวที่แตกต่างกันให้ผลค่อนข้างใกล้เคียงกันในเหล็กทุกคู่ และเหล็กกล้าผสมมีความหนาชั้นผิวขาวมากกว่าในเหล็กกล้าคาร์บอน

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ด้วย Two-way ANOVA โดยตั้งสมมุติฐานหลัก (H_0) ให้ค่าเฉลี่ยของความหนาชั้นผิวขาวของชั้นทดสอบต่างชนิดกัน และจากการเตรียมผิวที่ต่างกัน มีค่าความแข็งผิวไม่แตกต่างกัน และใช้การเปรียบเทียบค่า P-value ที่ได้จากการวิเคราะห์ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 หาก P-value มากกว่า จะยอมรับสมมุติฐานหลัก (H_0) จากการทดสอบทางสถิติพบว่าที่ปัจจัยชั้นทดสอบเหล็กกล้าต่างชนิดกันให้ค่า P-value เท่ากับ 0.001 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ชั้นทดสอบเหล็กกล้าต่างชนิดกันนั้นส่งผลต่อค่าความหนาชั้นผิวขาว ในขณะที่ปัจจัยความหยาบผิวที่เตรียมผิวชั้นทดสอบมาแตกต่างกันนั้น มีค่า P-value เท่ากับ 0.320 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการเตรียมผิว(ความหยาบผิว)ชั้นทดสอบมาแตกต่างกันนั้นไม่ส่งผลต่อค่าความหนาชั้นผิวขาวของชั้นทดสอบ ดังตารางที่ 4.9 ดังนั้นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความหนาชั้นผิวขาวจึงเป็นประเภทของชั้นทดสอบเหล็กกล้าที่ต่างชนิดกัน

ตารางที่ 4.9 แสดงผล One-way ANOVA : White layer ในประเภทชั้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซอพท์ในตารางดัง

One-way ANOVA : White layer versus Material					
Source	DF	SS	MS	F	P
Material	4	0.0000689	0.0000172	69.34	0.001
Surface Roughness	1	0.0000003	0.0000003	1.29	0.320
Error	4	0.0000010	0.0000002		
Total	9	0.0000702			
S = 0.0004984 R-Sq = 98.58 % R-Sq (adj) = 96.82 %					

4.5.2 พิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนาชั้นผิวขาวโดยการเตรียมผิวที่ต่างกันใน ชั้นทดสอบทั้ง 5 ชนิด กระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิ่ง



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ White layer และประเภทของชั้นทดสอบ
กระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิ่ง

ตารางที่ 4.10 แสดงผล One-way ANOVA : White layer ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่าน
การชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิ่ง

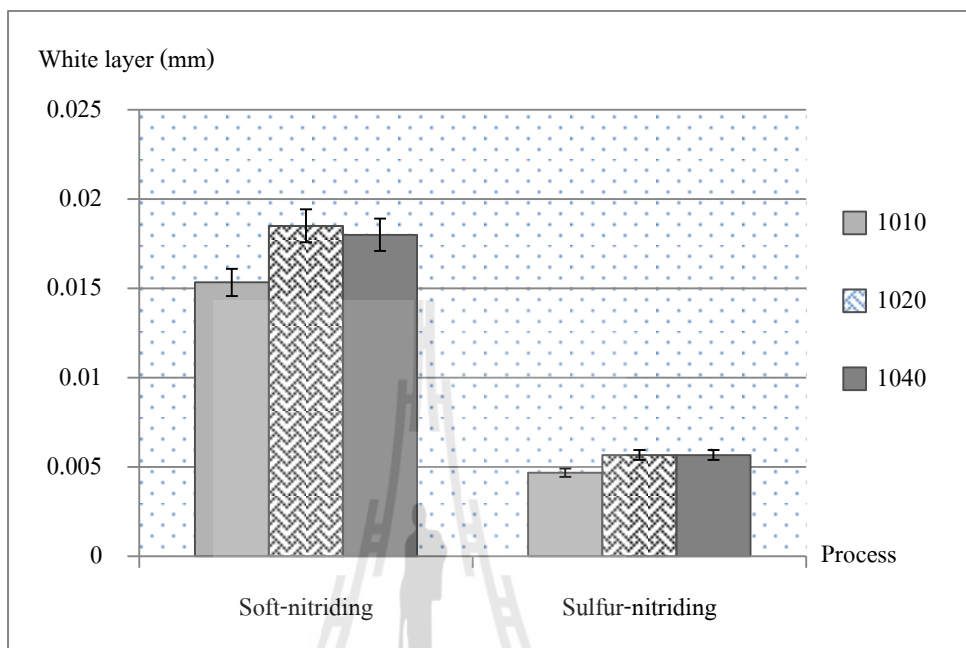
One-way ANOVA :White layer versus Material					
Source	DF	SS	MS	F	P
Material	4	0.0000338	0.0000085	153.35	0.000
Surface Roughness	1	0.0000000	0.0000000	0.02	0.905
Error	4	0.0000002	0.0000001		
Total	9	0.0000340			
S = 0.0002304 R-Sq = 99.38 % R-Sq (adj) = 98.60 %					

จากรูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาชั้นผิวขาว (White Layer) ซึ่งทดสอบ กับ ประเภทของชั้นทดสอบเหล็กกล้าที่ผ่านการเตรียมผิวมาแตกต่างกันทำการชุบแข็งด้วยกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ไนไตรดิง โดยเปรียบเทียบค่าความหนาชั้นผิวขาวโดยการเตรียมลักษณะผิวที่แตกต่างกัน จากกราฟรูปที่ 4.8 แนวโน้มไปในทางเดียวกันกับกระบวนการแก๊สซอฟต์ไนไตรดิง กล่าวคือ ในเหล็กกล้าผสมนั้นจะมีความหนาชั้นผิวขาวที่มากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน

จากการวิเคราะห์ทางสถิติ Two-way ANOVA โดยตั้งสมมุติฐานหลัก (H_0) ให้ค่าเฉลี่ยความหนาชั้นผิวขาวของชั้นทดสอบต่างชนิดกัน และจากการเตรียมผิวที่ต่างกัน มีค่าความหนาชั้นผิวขาวไม่แตกต่างกันและใช้การเปรียบเทียบค่า P-value ที่ได้จากการวิเคราะห์ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 หาก P-value มากกว่า จะยอมรับสมมุติฐานหลัก (H_0) พิจารณาในสองปัจจัย พบว่าปัจจัยชั้นทดสอบเหล็กกล้าต่างชนิดกันให้ค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ชั้นทดสอบเหล็กกล้าต่างชนิดกันนั้นมีผลต่อค่าความหนาชั้นผิวขาวในขณะที่ปัจจัยความหยาบผิวที่เกิดจากการเตรียมผิวที่ต่างกันนั้น มีค่า P-value เท่ากับ 0.905 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการเตรียมผิวชั้นทดสอบโดยให้ค่าความหยาบผิวที่ต่างกันนั้นไม่ส่งผลต่อค่าความหนาผิวชั้นผิวขาว ดังตารางที่ 4.10 ดังนั้นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความหนาชั้นผิวขาวจึงเป็นประเภทของชั้นทดสอบ เหล็กกล้าที่ต่างชนิดกันมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับกระบวนการแก๊สซอฟต์ไนไตรดิง

จากการทดสอบ ตารางที่ 4.9 และ 4.10 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความหนาชั้นผิวขาว คือ ประเภทของชั้นทดสอบเหล็กกล้าต่างชนิดกัน เนื่องจากเราแบ่งประเภทชั้นทดสอบ ออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือเหล็กกล้าคาร์บอน และ เหล็กกล้าผสม จึงได้นำมาวิเคราะห์ต่อ ได้ผลดังต่อไปนี้

4.5.3 พิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งผิวในเหล็กกล้าคาร์บอน (ปริมาณคาร์บอนแตกต่างกัน) ในกระบวนการชุบแข็งต่างกัน



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ White layer ที่ผ่านกระบวนการอบชุบต่างๆ เหล็กกล้าคาร์บอน

4.5.3.1 กระบวนการแก๊สซอพตีในทรายดิ่ง

ตาราง 4.11 แสดงผล One-way ANOVA : White layer ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซอพตีในทรายดิ่ง

One-way ANOVA :White layer versus Material					
Source	DF	SS	MS	F	P
Material	2	9.556	4.778	6.14	0.035
Error	6	4.667	0.778		
Total	8	14.222			

S = 0.8819 R-Sq = 67.19 % R-Sq (adj) = 56.25%

จากกราฟรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นผิวขาวของชั้นทดสอบกับกระบวนการชุบแข็งผิวในกลุ่มชั้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอน ที่มีปริมาณคาร์บอนต่างกันพบว่ากระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิงมีปริมาณความหนาชั้นผิวขาวที่น้อยกว่า ชั้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งด้วยกระบวนการแก๊สซอพท์ในทรายดิง ในทุกชั้นทดสอบ และโครงสร้างชั้นผิวขาวมีลักษณะเป็นแถบสีขาวที่บริเวณผิวชั้นทดสอบ เป็นสารประกอบไนโตรเจน $Fe_{2-3}N$ (โครงสร้าง ϵ) ซึ่งเกิดขึ้นในทั้งสองกระบวนการซอพท์ในทรายดิง และ กระบวนการซัลเฟอร์ในทรายดิง

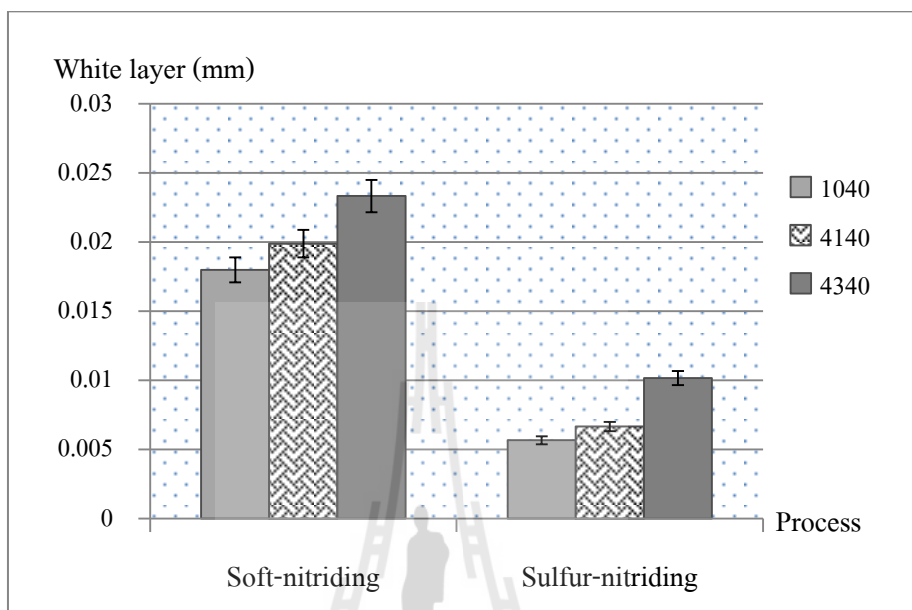
4.5.3.2 กระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง

ตาราง 4.12 แสดงผล One-way ANOVA : White layer ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง

One-way ANOVA :White layer versus Material					
Source	DF	SS	MS	F	P
Material	2	1.56	0.78	0.32	0.739
Error	6	14.67	2.44		
Total	8	16.22			
S = 1.563 R-Sq = 9.59 % R-Sq (adj) = 0.00%					

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ One way ANOVA โดยตั้งสมมุติฐานหลัก (H_0) ให้ค่าเฉลี่ยความหนาชั้นผิวขาวเนื่องมาจากการมีปริมาณคาร์บอนต่างกัน มีความหนาชั้นผิวขาวไม่ต่างกัน และค่านัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 หาก P-value มากกว่า α จะยอมรับสมมุติฐานดังกล่าว โดยทำการวิเคราะห์ผล ได้ดังนี้ ในกระบวนการแก๊สซอพท์ในทรายดิง P-value มีค่าเท่ากับ 0.035 นั้นหมายความว่า ในกระบวนการชุบแข็งผิวแก๊สซอพท์ในทรายดิงการมีเหล็กที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนต่างกัน ทำให้ความหนาชั้นผิวขาวต่างกันไปด้วย ในขณะที่กระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิงตามตารางที่ 4.10 พบว่าค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.739 ซึ่งสามารถบอกได้ว่า ในกระบวนการชุบแข็งผิวแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิงที่ชุบแข็งชั้นทดสอบที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนต่างกัน ไม่ทำให้ความหนาชั้นผิวขาวนั้นแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05

4.5.4 พิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งผิวในเหล็กกล้าผสม (ปริมาณส่วนผสมต่างกัน) ในกระบวนการชุบแข็งต่างกัน



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ White layer ที่ผ่านกระบวนการอบชุบต่าง ๆ ในเหล็กกล้าผสม

4.5.4.1 กระบวนการแก๊สซอพตีในทรายดิ่ง

ตาราง 4.13 แสดงผล One-way ANOVA : White layer ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซอพตีในทรายดิ่ง

One-way ANOVA : White layer versus Material					
Source	DF	SS	MS	F	P
Material	2	63.21	31.60	12.91	0.007
Error	6	14.69	2.45		
Total	8	77.90			
S = 1.565 R-Sq = 81.14 % R-Sq (adj) = 74.85 %					

จากผลการทดสอบความหนาชั้นผิวขาวชั้นทดสอบเหล็กกล้าผสมกับกระบวนการแก๊สซอพตีในทรายดิ่งและแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิ่ง แสดงผลดังรูปที่ 4.10 พบว่าความหนาชั้นผิวขาวในกระบวนการแก๊สซอพตีในทรายดิ่งมีมากกว่าในกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิ่ง ในทุกชั้น

ทดสอบและความหนาชั้นผิวขาวของชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวทั้งสอง จากการตรวจสอบ เหล็กกล้าผสมที่มีปริมาณคาร์บอนเท่ากัน พบว่าความหนาชั้นผิวขาวในเหล็กกล้าผสม AISI 4340 มากที่สุดในทั้ง 2 กระบวนการ และ ความหนาชั้นผิวขาวในกระบวนการแก๊สซอฟต์ในทรายดิงมีความหนามากกว่าในกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง

เมื่อนำมาพิจารณาเฉพาะในส่วนของเหล็กกล้าผสม(ปริมาณคาร์บอนเท่ากัน) ในกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิงวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือทางสถิติ One-way ANOVA ตามตารางที่ 4.13 โดยตั้งสมมุติฐานหลัก (H_0) ให้ค่าเฉลี่ยความหนาชั้นผิวขาวของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าผสมที่มีธาตุผสมต่างชนิดกัน มีค่าความหนาชั้นผิวขาวไม่แตกต่างกันและใช้การเปรียบเทียบค่า P-value ที่ได้จากการวิเคราะห์ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 หาก P-value มากกว่า ระดับนัยสำคัญ (α) จะยอมรับสมมุติฐานหลัก (H_0) และจากผลการทดสอบพบว่า ค่า P-value ของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่างชนิดกัน เท่ากับ 0.000 นั้นแสดงว่า ในกระบวนการชุบแข็งผิวแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง ชิ้นทดสอบเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนต่างชนิดกัน ทำให้ค่าความแข็งผิวแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญ

4.5.4.2 กระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง

ตาราง 4.14 แสดงผล One-way ANOVA : White layer ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง

One-way ANOVA : White layer versus Material					
Source	DF	SS	MS	F	P
Material	2	72	36	21.60	0.002
Error	6	10	1.67		
Total	8	82			
S = 1.291 R-Sq = 87.80 % R-Sq (adj) = 83.74 %					

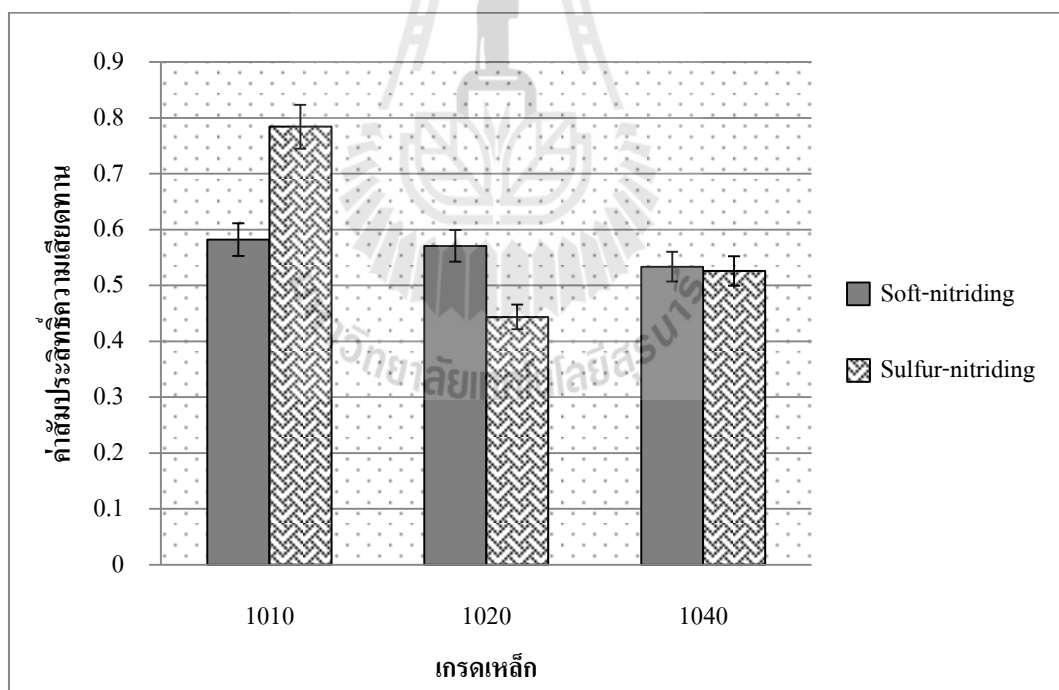
ผลการทดสอบนำไปยืนยันด้วยวิธีทางสถิติ One – way ANOVA โดยตั้งสมมุติฐานหลัก (H_0) ให้ค่าเฉลี่ยความหนาชั้นผิวขาวเนื่องมาจากการมีชนิดธาตุผสมต่างกัน แต่มีปริมาณคาร์บอนเท่ากันที่ 0.4 % มีความหนาไม่ต่างกัน และค่านัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 หาก P-value มากกว่า α จะยอมรับสมมุติฐานดังกล่าว โดยทำการวิเคราะห์ผล ได้ดังนี้ ในกระบวนการแก๊สซอฟต์ในทรายดิง P-value มีค่าเท่ากับ 0.007 นั้นหมายความว่า ค่าเฉลี่ยความหนาชั้นผิวขาวเนื่องมาจากการมีชนิดธาตุผสมต่างกัน แต่มีปริมาณคาร์บอนเท่ากันที่ 0.4 % มีความหนาชั้นผิวขาวแตกต่างกัน ส่วนในกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง มีค่า P-value เท่ากับ 0.002 ให้ผลไปในทางเดียวกันนั่นคือ ที่

ธาตุผสมต่างกัน แต่มีปริมาณคาร์บอนที่ 0.4% เท่ากัน ไม่ส่งผลให้ค่าความหนาชั้นผิวขาวแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05

การเติมธาตุผสมจำพวก อลูมิเนียม โครเมียม และ โมลิบดีนัมถูกนำมาใช้ในลักษณะที่เป็น Nitride former หรือ ธาตุที่ช่วยในการฟอร์มสารประกอบไนไตรด์ (Karl-Erik Thelning, 1984) ซึ่งในวัสดุที่เราศึกษา ในเหล็กกล้าผสม AISI4140 , AISI 4340 ประกอบด้วยโครเมียม 1% โมลิบดีนัม 0.27% ในส่วนของเหล็กกล้าผสม AISI 4340 มีในส่วนของนิกเกิล 1.71% ดังนั้นเราจึงพบความสอดคล้องในผลการทดลองว่า AISI 4140 และ AISI 4340 มีส่วนของความหนาชั้นผิวขาวเพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังแสดงในรูป 4.10

4.6 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย

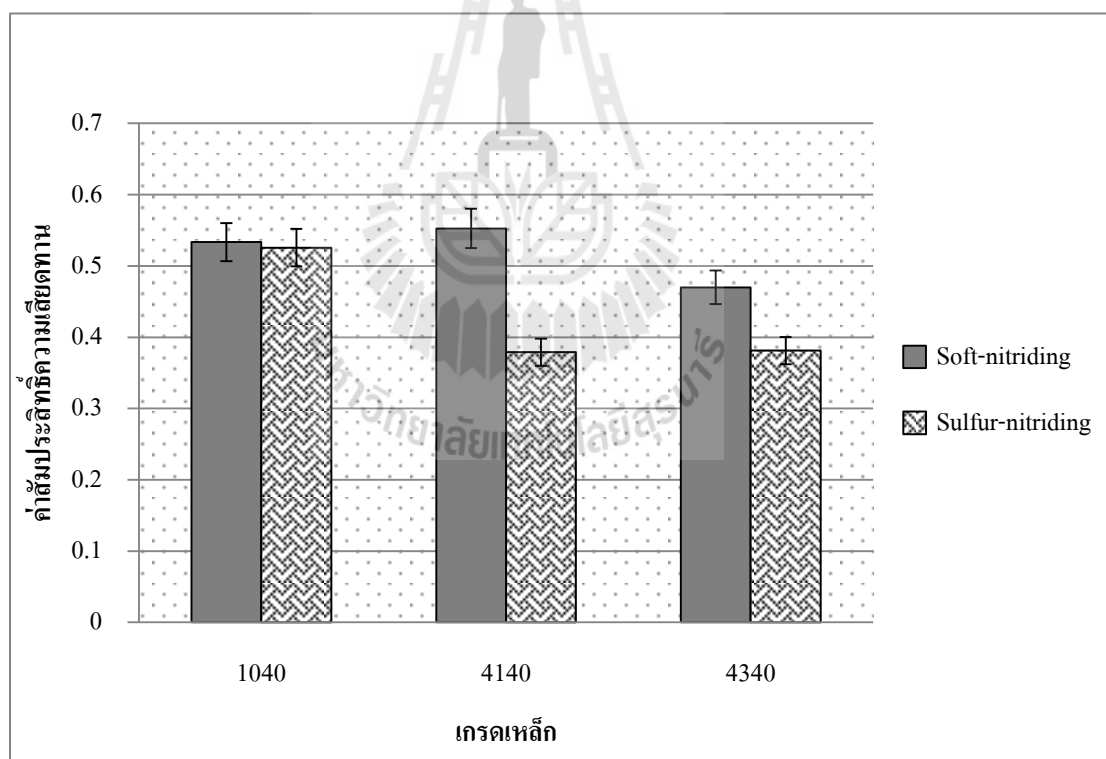
4.6.1 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านการชุบแข็งผิวกระบวนการแก๊สซอพต์ไนไตรดิงและแก๊สซัลเฟอร์ไนไตรดิง



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายกับเหล็กกล้าคาร์บอนที่นำไปชุบแข็งในกระบวนการต่าง ๆ

จากกราฟการวิเคราะห์ผลค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายทั้งสองกระบวนการในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนพบว่า ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของชิ้นทดสอบให้ผลไปในทางเดียวกันคือผลที่ได้จากการอบชุบด้วยกระบวนการแก๊สซอฟต์ไนตรายดิงมีค่าน้อยกว่าชิ้นทดสอบที่อบชุบด้วยกระบวนการแก๊สซอฟต์ไนตรายดิง แต่ในเหล็กกล้า AISI 1020 ให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายทั้งสองกระบวนการไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าในเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1010, AISI 1020, AISI 1040) เหมาะที่จะอบชุบด้วยกระบวนการแก๊สซอฟต์ไนตรายดิงเพื่อให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่ดี (ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายต่ำ) กว่าที่เหล็กกล้าคาร์บอนผ่านการอบชุบด้วยแก๊สซัลเฟอร์ไนตรายดิง

4.6.2 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายในกลุ่มเหล็กกล้าผสมที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซอฟต์ไนตรายดิงและแก๊สซัลเฟอร์ไนตรายดิง



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายกับเหล็กกล้าผสมที่นำไปชุบแข็งในกระบวนการต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.12 การวิเคราะห์ผลค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายทั้งสองกระบวนการในกลุ่มเหล็กกล้าผสมพบว่า ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม (AISI4140, AISI4340) ค่าสัมประสิทธิ์ของชั้นทดสอบที่ได้จากการอบชุบด้วยกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ไนตรายดิงมีค่าน้อยกว่าชั้นทดสอบที่อบชุบด้วยกระบวนการแก๊สซอฟต์ไนตรายดิง และ ในเหล็กผสมอัลลอยเหมาะที่จะอบชุบด้วยกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ไนตรายดิง เพราะให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่ดีกว่า (น้อยกว่า) เมื่อเทียบกับกลุ่มที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนเท่ากันนั้น พบว่า เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (AISI 1040) มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายสูงกว่าเหล็กกล้าผสมในทุกกระบวนการอบชุบ และเหล็กกล้าผสม (AISI 4340) ให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายน้อยที่สุดในทั้งสองกระบวนการ กล่าวคือมีค่าต่ำกว่าในเหล็กกล้าคาร์บอน และเหล็กกล้าผสมด้วยกัน อธิบายเพิ่มเติมในส่วนของผลค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายในกระบวนการแก๊สซอฟต์ไนตรายดิงและกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ไนตรายดิง ก่อนข้างให้ผลชัดเจนในเรื่องของค่าความแข็งผิวที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย กล่าวคือในเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีค่าความแข็งผิวที่ต่ำ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายจะสูง สรุปได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายแปรผกผันกับค่าความแข็งผิว โดยได้ทำการยืนยันจากวิธีทางสถิติ ดังรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 และนอกจากนี้ยังพบการศึกษาในส่วนของชั้นโครงสร้างชั้นผิวขาวมีผลต่อการลดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย $Fe_{2-3}N$ (ϵ) (phase possess a lamellar hexagonal close-packed microstructure) ซึ่งช่วยลดความร้อนระหว่างการทดลองด้วยจากข้อมูลการทดลองในข้างต้น พบชั้นผิวขาวในเหล็กกล้าผสม (AISI 4140, AISI 4340) มีความหนาของโครงสร้างชั้นผิวขาวที่มากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1010, AISI1020, AISI1040) เป็นเหตุผลสนับสนุนแต่จะเห็นได้ว่ากระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ไนตรายดิง แม้จะมีชั้นผิวขาวที่น้อยกว่า แต่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายผิวที่ต่ำกว่ากระบวนการแก๊สซอฟต์ไนตรายดิง เพราะ เกิดชั้นสารประกอบ (Fe_3S) ขึ้นซึ่งเชื่อว่าสารประกอบตัวนี้จะทำหน้าที่เป็น สารหล่อลื่นให้แก่ผิวหน้าชั้นทดสอบ และจากการทดลองพบว่า เมื่อชั้นทดสอบเหล็กกล้าผสมไปอบชุบด้วยกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ไนตรายดิงให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่น้อยกว่า เหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1040) โดยที่เหล็กกล้าผสม AISI 4340 มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่ต่ำที่สุด โดยพบแนวโน้มในทั้งสองกระบวนการ

4.7 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างเครื่อง pin on disc กับ เครื่อง Friction Machine)

4.7.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pin on disc เทียบกับ Friction Machine

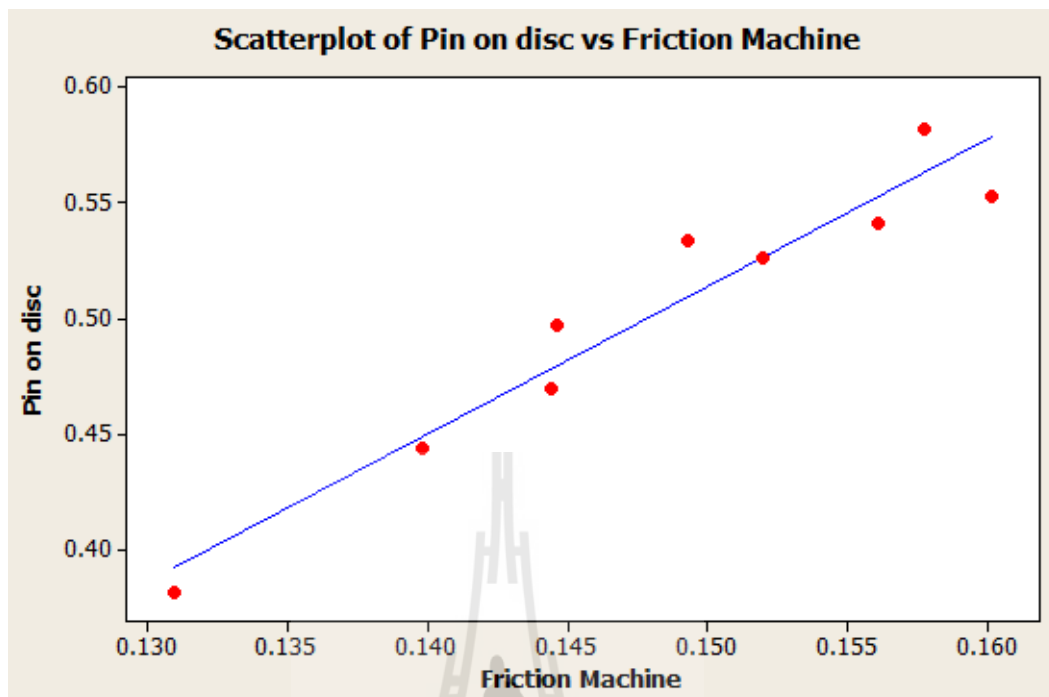
Correlations: Friction Machine, Pin on disc

Pearson correlation of Friction Machine and Pin on disc = 0.963

P-Value = 0.000

Regression Analysis: Pin on disc versus Friction Machine					
The regression equation is					
Pin on disc = -0.445 + 6.39 Friction Machine					
Predictor	Coef	SE Coef	T	P	
Constant	-0.4449	0.1007	-4.42	0.003	
Friction Machine	6.3889	0.6776	9.43	0.000	
S = 0.0179926		R-Sq = 92.7%		R-Sq (adj) = 91.7%	
Analysis of Variance					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	0.028781	0.028781	88.90	0.000

รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ Correlation และ Regression ของเครื่องทดสอบ Pin on disc และเครื่อง Friction Machine



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ Correlation และ Regression ของเครื่องทดสอบ Pin on disc และเครื่อง Friction Machine

จากค่า $r=0.963$ แสดงความสัมพันธ์แบบ positive correlation มีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับแบบเกือบ perfect correlation เมื่อนำไปทดสอบพบว่าค่า p-value จากการทดสอบ มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้คือ 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าเครื่องวัดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (Adjusted R-squared, R-Sq (adj) ซึ่งมีค่า 91.7 % แสดงว่าการอ่านค่าทั้งสองเครื่องมีตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ (Error) อยู่ 8.3% และสามารถสร้างสมการ ได้เป็น

$$\text{Pin on disc} = -0.445 + 6.39 \text{ Friction Coefficient} \quad (4.1)$$

4.8 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ค่าความแข็งผิว (surface hardness) และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction Coefficient)

4.8.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน กระบวนการแก๊สซอพตี๋ในทรายดิง

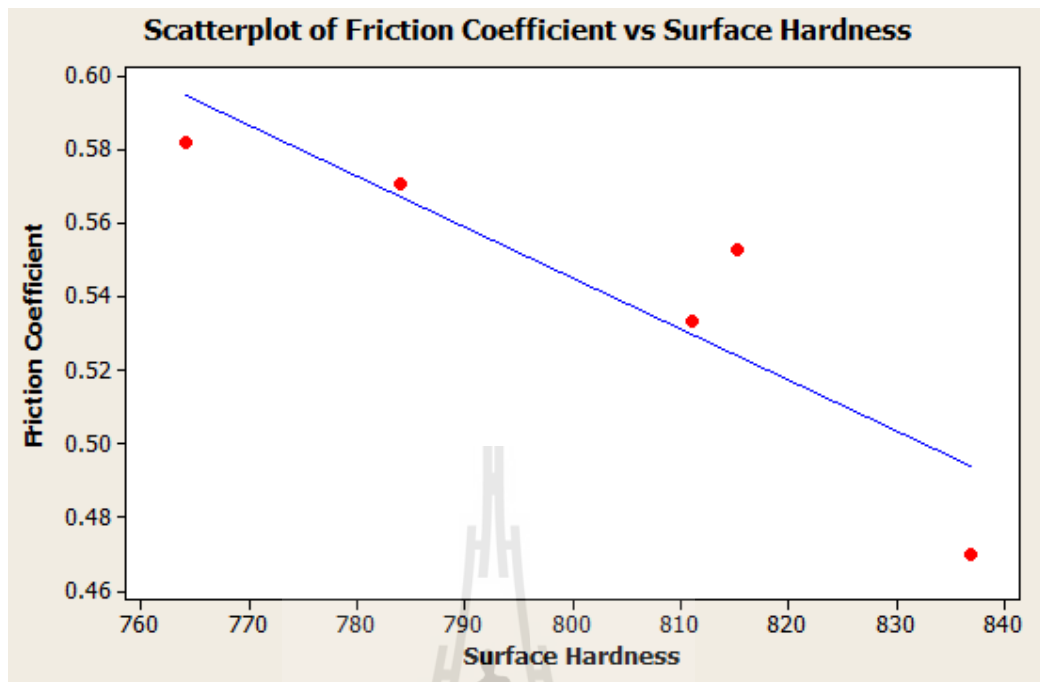
Correlations: Friction Machine, Pin on disc

Pearson correlation of Friction Machine and Pin on disc = 0.-892

P-Value = 0.042

Regression Analysis: Pin on disc versus Friction Machine					
The regression equation is					
Friction Coefficient = 1.65 – 0.00139 Surface hardness					
Predictor	Coef	SE Coef	T	P	
Constant	1.6545	0.3262	5.07	0.015	
Surface Hardness	-0.0013869	0.0004064	-3.41	0.042	
S = 0.0230750		R-Sq = 79.5%		R-Sq (adj) = 72.7%	
Analysis of Variance					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	0.0062021	0.0062021	11.65	0.042

รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งผิว (Surface hardness) และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกระบวนการแก๊สซอพตี๋ในทรายดิง



รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ Regression ของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และค่าความแข็งผิวกระบวนการแก๊สซอฟต์ในทรายดิ่ง

จากค่า $r = -0.892$ แสดงความสัมพันธ์แบบ negative correlation มีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับแบบเกือบ perfect correlation และมีความสัมพันธ์กันแบบผกผันกัน เช่นกันและเมื่อนำไปทดสอบพบว่าค่า p-value จากการทดสอบ มีค่าเท่ากับ 0.042 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้คือ 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าความแข็งผิวมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน เมื่อมีความแข็งผิวสูงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าน้อยลง เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (Adjusted R-squared, R-Sq (adj) ซึ่งมีค่า 72.7 % แสดงว่าการอ่านค่าทั้งสองเครื่องมีตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ (Error) อยู่ 27.3% ซึ่งเห็นได้ชัดว่ามีแนวโน้มที่ดีขึ้นและสามารถสร้างสมการ ได้เป็น

$$\text{Friction Coefficient} = 1.65 - 0.00139 \text{ Surface hardness} \quad (4.2)$$

4.8.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน กระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิ่ง

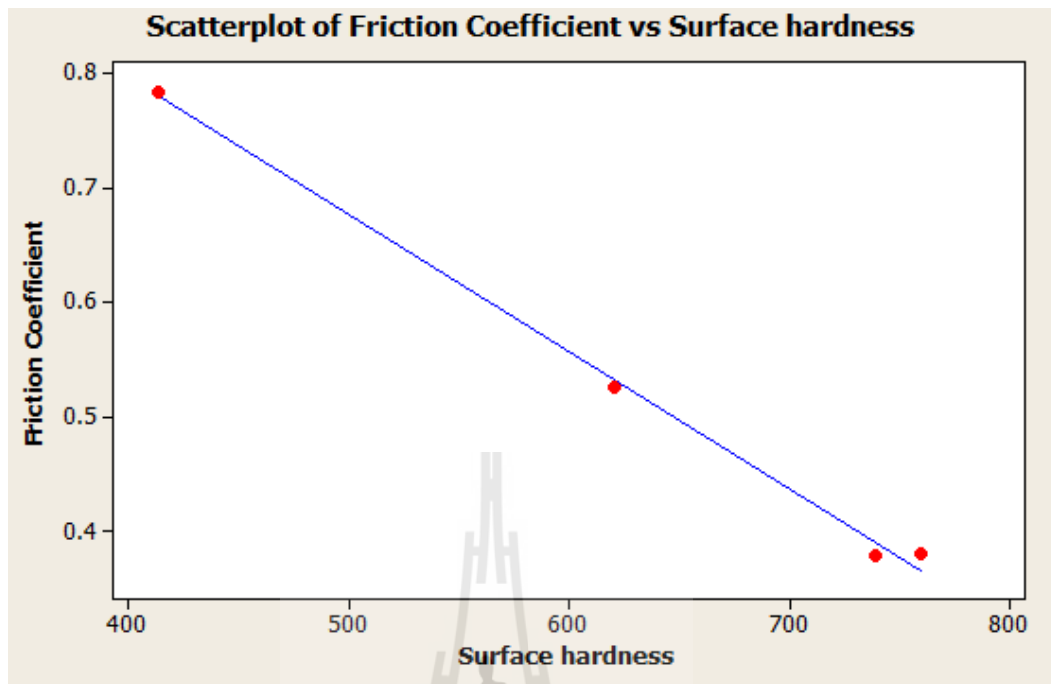
Correlations: Friction Machine, Pin on disc

Pearson correlation of Friction Machine and Pin on disc = -0.998

P-Value = 0.002

Regression Analysis: Pin on disc versus Friction Machine					
The regression equation is					
Friction Coefficient = 1.28 – 0.00120 Surface hardness					
Predictor	Coef	SE Coef	T	P	
Constant	1.27565	0.03505	36.40	0.001	
Surface Hardness	-0.00119783	0.00005411	-22.14	0.002	
S = 0.014880	R-Sq = 99.6%	R-Sq (adj) = 99.4%			
Analysis of Variance					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	0.10849	0.10849	490.00	0.002

รูปที่4.17 ผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งผิว (Surface hardness) และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิ่ง



รูปที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ Regression ของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และค่าความแข็งผิวกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดีง

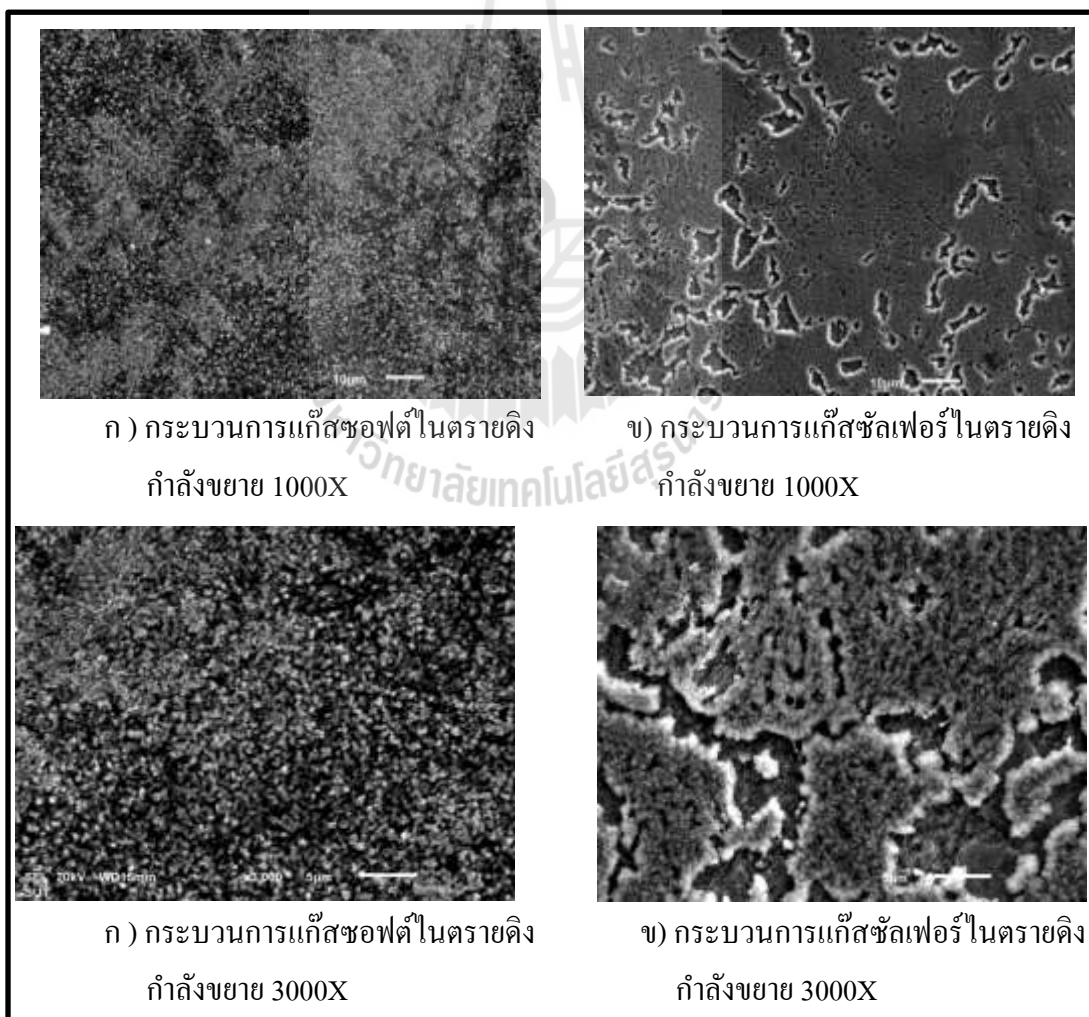
จากค่า $r = -0.998$ แสดงความสัมพันธ์แบบ negative correlation มีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับแบบเกือบ perfect correlation มีความสัมพันธ์กันแบบผกผัน เมื่อนำไปทดสอบพบว่าค่า p-value จากการทดสอบ มีค่าเท่ากับ 0.002 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้คือ 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าเครื่องวัดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (Adjusted R-squared, R-Sq (adj) ซึ่งมีค่า 99.4 % แสดงว่าการอ่านค่าทั้งสองเครื่องมีตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ (Error) อยู่ 0.6 % กรณีนี้ตัดเหล็ก AISI1020 ออกจากการพิจารณา และสามารถสร้างสมการ ได้เป็น

$$\text{Friction Coefficient} = 1.28 - 0.00120 \text{ Surface hardness} \quad (4.3)$$

4.9 ผลการวิเคราะห์สภาพผิวภายนอกชิ้นทดสอบ

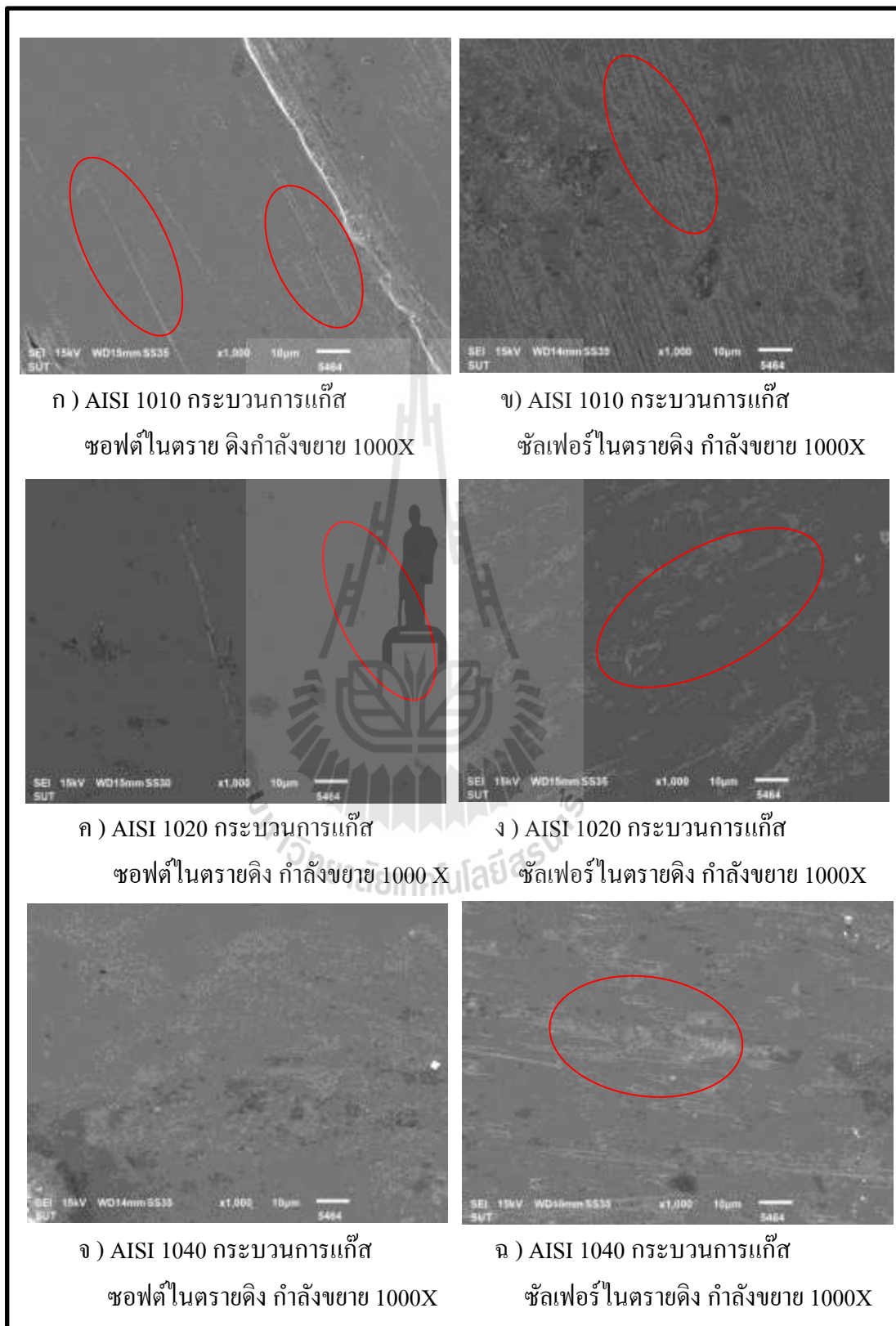
พื้นผิวการสึกหรอของชิ้นทดสอบหลังการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21 พบว่า ในชิ้นทดสอบ AISI 1010 เกิดการสึกหรอแบบขูดขีด มีระดับความเสียหายมีลักษณะเป็นรอย ตามแนวโกล ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของ (Abrasive wear) ลักษณะเช่นนี้พบได้ในชิ้นทดสอบ AISI 1010 ในทั้งสองกระบวนการ แก๊สซอพท์ไนตรายดิงและแก๊สซัลเฟอร์ไนตรายดิง และพบลักษณะเช่นเดียวกันนี้ในชิ้นทดสอบ AISI 1020 กระบวนการแก๊สซอพท์ไนตรายดิง ขณะที่ในเหล็กเกรด AISI 1040 AISI 4140 และ AISI 4340 พบลักษณะการเกิดการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesion wear) โดยมีลักษณะเด่นคือเกิดการยึดติดบริเวณรอยต่อระหว่างผิวสัมผัส การเคลื่อนที่ ทำให้เกิดแรงดึงส่วนที่อ่อนแอบริเวณใต้การสึกหรอนี้ขาดออกจากกัน กลายเป็นการสึกหรอในลักษณะแผ่นหนา

4.9.1 สภาพผิวชิ้นทดสอบก่อนการทดสอบ pin on disc

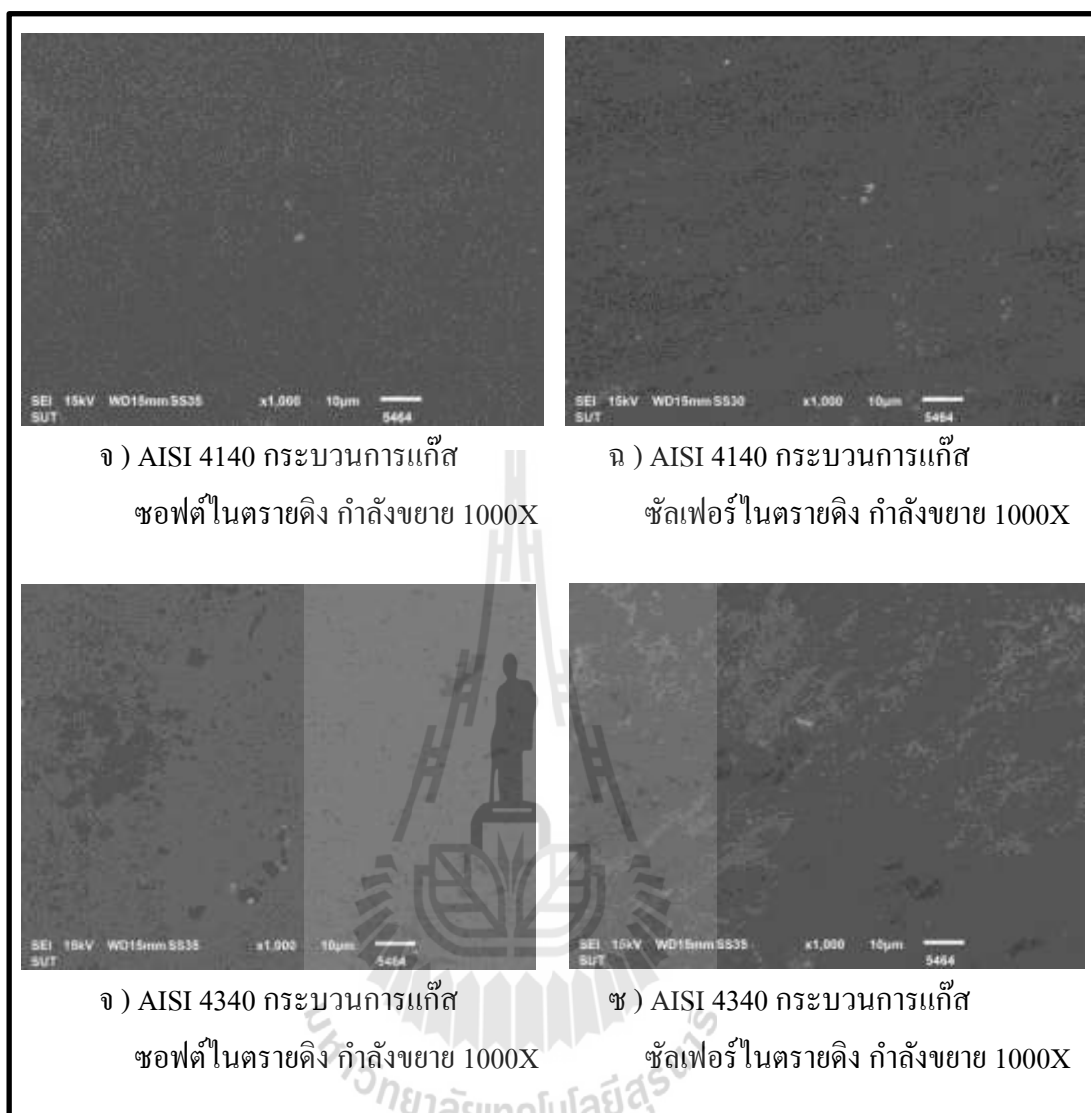


รูปที่ 4.19 แสดงภาพถ่าย SEM (Scanning electron microscope) สภาพผิวหน้าของ
หมุดชิ้นทดสอบ

4.9.2 สภาพผิวชิ้นทดสอบหลังการทดสอบ pin on disc



รูปที่ 4.20 แสดงภาพถ่าย SEM พื้นผิวการสึกหรอภายหลังการทดสอบ pin on disc



รูปที่ 4.21 แสดงภาพถ่าย SEM พื้นผิวการสึกหรอภายหลังการทดสอบ pin on disc

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลจากการดำเนินงานวิจัยเรื่อง ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของผิวเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซอพต์ในทรายดิงและแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง สามารถสรุปผลการวิจัยได้ ดังนี้

5.1.1 ผลกระทบของความเรียบผิวจากการเตรียมชิ้นของทดสอบเหล็กกล้าก่อนการชุบแข็งด้วยกระบวนการแก๊สซอพต์ในทรายดิง แก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง ต่อโครงสร้างความหนาชั้นผิวขาว และความแข็งผิวพบข้อสรุป ดังต่อไปนี้

กระบวนการเตรียมผิวก่อนการชุบแข็งผิว โดยการเตรียมความหยาบผิวที่เรียบมากแบบ shot blasting+polishing นั้นไม่สามารถสร้างชั้นผิวขาวให้เกิดบนชิ้นทดสอบได้ ในขณะที่ทั้งวิธีการเตรียมผิวแบบ shot blasting และ shot blasting+grinding สามารถสร้างชั้นผิวขาวบนชิ้นทดสอบและส่งผลให้ได้ความเรียบผิวที่แตกต่างกันในชิ้นทดสอบก่อนทำการชุบแข็ง จากผลการทดลองได้พบว่าผลกระทบของความแตกต่างของความเรียบผิวชิ้นทดสอบไม่ส่งผลต่างอย่างมีนัยสำคัญ ต่อค่าความแข็งผิวกับความหนาชั้นผิวขาวที่เกิดในชิ้นทดสอบทั้งในชิ้นทดสอบทั้งเหล็กกล้าคาร์บอน(AISI 1010, 1020, 1040) และเหล็กกล้าผสม(AISI 4140, 4340) ที่ผ่านการชุบแข็งด้วยกระบวนการแก๊สซอพต์ในทรายดิงและแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง

การชุบแข็งด้วยกระบวนการแก๊สซอพต์ในทรายดิงให้ค่าความแข็งผิวและความหนาชั้นผิวขาวที่มากกว่าการชุบแข็งด้วยกระบวนการซัลเฟอร์ในทรายดิง ผลการทดลองพบว่าเกิดการเกิดชั้นผิวขาว ในเหล็กเกรด AISI 1010, 1020, 1040, 4140, 4340 มีความหนาเพิ่มมากขึ้นตามลำดับและเมื่อเทียบกับซัลเฟอร์ในทราย พบว่าความหนาชั้นผิวขาวที่เกิดในกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิงน้อยกว่าความหนาชั้นผิวขาวที่เกิดในกระบวนการแก๊สซอพต์ในทรายดิง

5.1.2 ผลสัมประสิทธิ์ความเสียหายของเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการ แก๊สซอพต์ในทรายดิง และแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง

เหล็กกล้าผสม (AISI 4140, AISI 4340) ที่ผ่านกระบวนการแก๊สซอพต์ในทรายดิงมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่สูงกว่ากระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง เนื่องจากอิทธิพลของเหล็กซัลไฟด์ที่ผ่านการชุบแข็งด้วยกระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิง ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (self-lubricant) ให้แก่ชิ้นทดสอบ

เหล็กกล้าผสม AISI 4340 มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ต่ำกว่าชั้นทดสอบอื่น ๆ ในทั้งกระบวนการแก๊สซอฟต์ในทรายดิ่ง และแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิ่ง

ค่าความแข็งผิวสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในกระบวนการแก๊สซอฟต์ในทรายดิ่งและแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิ่ง

5.1.3 ผลสหสัมพันธ์เครื่อง pin on disc และเครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจากเครื่องที่ประดิษฐ์ (Friction Machine)

เครื่องวัดสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction Machine) และ เครื่อง Pin on disc ทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน ในแบบ positive correlation และสามารถสร้างสมการในการทำนายค่า ดังนี้

$$\text{Pin on disc} = -0.445 + 6.39 \text{ Friction Coefficient}$$

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จากงานวิจัยได้ศึกษาเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม จากกระบวนการอบชุบต่าง ๆ เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาวัสดุ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุชนิดอื่น ๆ ด้วย เพื่อมุมมองแนวคิด และเพื่อเลือกนำไปผลิตชิ้นส่วนที่ต้องการ โดยกระบวนการแก๊สซอฟต์ในทรายดิ่ง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในเพลลาข้อเหวี่ยงได้เป็นอย่างดี ขณะที่กระบวนการแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิ่ง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานแหวนลูกสูบ

5.2.2 เครื่องสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction Machine) ที่ทางผู้วิจัยได้จัดทำขึ้น ควรมีการติดตั้งในส่วนของมอเตอร์เพื่อความเสถียร และสามารถบันทึกค่าได้ด้วยตัวของเครื่องเอง และมีการบังคับทิศทางการเคลื่อนที่ของชิ้นทดสอบให้เป็นแนวเส้นตรงมากยิ่งขึ้น เพื่อสร้างเครื่องมือทดสอบนี้ให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

5.2.3 จากงานวิจัยพบว่าในกระบวนการอบชุบแก๊สซัลเฟอร์ในทรายดิ่ง ไม่เหมาะแก่การอบชุบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

รายการอ้างอิง

- Wang Lijie, Xing Yazhe, Wang Hongbo, and Hao Jainmin (2010). Effect of nitriding-Sulfurizing composite treatment on the tribological behavior of titanium alloys, **RARE METALS**, Vol.29, No.6. Dec 2010, p.604
- B. Selcuk, R. Ipek, M.B. Karamis, V. Kuzucu, (1996). An investigation on surface properties of treated low carbon and alloyed steels. **Journal of Material Processing Technology**, December 1999. pp.310-317.
- ไพฑิณ ฤกษ์จิรวัดดี (2555). **หลักการพื้นฐานของกรรมวิธีทางความร้อนของเหล็กกล้า**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- อิทธิพล เดี่ยววนิชย์. (2550). **การทดสอบความแข็งและการทดสอบการกระแทก**. สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- Selcuk, B., Ipek, R., and Karamis, M. (2003). A study on friction and wear behavior of carburizing, carbonitriding and borided AISI 1020 steel. **Journal of materail processingtechnology**. 141: 189-196.
- Linhu Tang, Chengxiu Gao, Jianlong Huang, Hongyan Zhang, Wenchun Chang (2013). Dry sliding friction and wear behavior of hardened AISI D2 tool steel with different hardness levels. **Tribology International**, May 2013. pp 165-173
- Selcuk, B., Ipek, R., and Karamis, M. (2003). A study on friction and wear behavior of carburizing, carbonitriding and borided AISI 1020 steel. **Journal of materail processingtechnology**. 141: 189-196.
- มนัส สติรจินดา. (2543). **เหล็กกล้า**. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย
- มนัส สติรจินดา. (2543). **วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก**. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย
- ASM International. (2005). **ASM Handbook Volume 1 Properties and Selection: Iron, Steel and High-Performance Alloys**. USA: ASM International.
- ASM International. (1991). **ASM Handbook Volume 4 Heat treating**. USA: ASM International.

Annual Book of ASTM Standard, 2013. **Standard Guide for Measuring and Reporting Friction Coefficients.** ASTM G115-10, USA:ASM International

Annual Book of ASTM Standard, (1998). **Standard Test Method for Static and Kinetic Coefficients of Friction of Plastic Film and Sheeting,** ASTM D1894-99, Vol.9.02.

Annual Book of ASTM Standard, (1998). **Standard Test Methods for Wear Testing with a Pin-on-disk Apparatus.** ASTM G99-05, USA:ASM International

Siwadamrongpong, S., Khaengkarn, S., and Tachee, K. (2011). Influence of combined processes between gas soft nitriding and carburizing to hardness of low carbon steel. **Advanced Materials Research.** 415-417: 1186-1189.



The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, light gray watermark centered on the page. It features a stylized figure of a person standing on a platform, with a large 'S' and 'R' behind them, all enclosed within a circular border containing the university's name in Thai script.

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Siwadamrongpong, S., Sirijit, C. (2015). **Effect of gas sulfur-nitriding processes and gas soft-nitriding on the alloy and plain carbon steel**. South East Asian Technical University Consortium (SEATUC 2015). 27 – 30 July. Suranaree University of Technology. Thailand.

Siwadamrongpong, S., Sirijit, C. (2016). **A Study of friction coefficient of gas soft nitriding and sulfur nitriding treatment on the plain carbon and alloy steel** . South East Asian Technical University Consortium (SEATUC 2016). 22-24 Febuary. Shibaura Institute of Technology. Japan.



A STUDY OF FRICTION COEFFICIENT OF GAS SOFT NITRIDING AND SULFUR NITRIDING TREATMENT ON THE PLAIN CARBON AND ALLOY STEEL

Somsak Siwadamrongpong*, Sirijit Champee

School of Manufacturing Engineering,

Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,

111 University Avenue, Muang District, Nakhonratchasima 30000, Thailand.

* E-mail: somsaksi@sut.ac.th. Tel: 0-4422-4236, Fax: 0-4422-4566

ABSTRACT

The metallurgy associated with improvement in mechanical properties tends to perform with the procedure of heat treatment one kind of well-known heat treatment is gas surface hardening method. For instance gas soft nitriding and sulfur nitriding which two technical well developed in friction and wear. This study was aimed to investigate friction coefficient and influence of steel that treated on gas soft nitriding and gas sulfur nitriding. The friction coefficient are conducted with Pin on disk under dry sliding condition which observed in this research. Pin of plain carbon and alloy steel and disk made from D2 steel were used in this experiments. First, the specimen was normalized by normalizing and shot blasting. Then the specimen was prepared surface and was treated by gas soft nitriding, gas sulfur nitriding. The result the microstructures, found that white layer on sulfur nitriding specimen less than soft nitriding. The worn surface distributions of specimens are examined after and before friction test. The surface phases of the treated are determined by X-ray diffraction method. $Fe_{1-x}S$ phase is obtained on the sulfur nitriding surface.

1. INTRODUCTION

In the recent plain carbon and alloy steel is the use widely in many application of construction steel such as equipment of crankshaft piston in automotive engine, machinery, agriculture construction there have been a requirement to improve fatigue and wear resistance.

The technical of thermochemical treatment such as gas soft-nitriding and gas sulfur- nitriding are extensively used for the performance modification in term of friction coefficient and wear resistance (Industrial manual), which the gas soft nitriding process

is nitempered under relatively safe conditions using a gaseous medium containing nitrogen gas to build white layer and improve mechanical properties of steel. And gas sulfur-nitriding technical process in an atmosphere of NH_3 and H_2S in endothermically derived propane carrier gas, this method suitable for steel, this has been investigated. (Osamu momose and Sosuke uchida, 1986)

By research of, Wang Lijie, Xing Yazhe, Wang Hongbo, and Hao Jianmin (2009) have studied of effect of nitriding sulfurizing composite treatment on Ti alloy and the result by nitriding sulfurizing composite treatment was covered by numerous spherical bulges while the modified layer for nitriding surface was composed of larger irregular particles. According to the results of friction and wear tests, the friction coefficient of alloy after nitriding-sulfurizing composite treatment at different loads is demonstrated the various values.

G. Nicoletto, A. Tucci, L. Esposito was studied on friction and the wear resistance of spheroidal and lamellar cast irons with treated by nitriding and nitrocarburizing after treated studied on dry sliding with pin on disk apparatus the result spheroidal cast iron almost always presents a lower wear rate than the lamellar cast iron, independently of the surface treatment. The results demonstrated that the wear rate of spheroidal part is lower than the lamellar cast irons

The aims of this study to investigate the influence of gas heat treatment by gas soft-nitriding and gas sulfur-nitriding that effect on friction coefficient of the plain carbon steel and alloy steel

2. EXPERIMENT PROCEDURES

2.1 Materials and thermochemical treatments

AISI	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	AL	Fe
1040	0.429	0.237	0.661	0.021	0.013	0.215	0.045	0.056	0.011	0.001	0.006	Bal.
4140	0.417	0.222	0.712	0.007	0.005	0.167	0.039	1.098	0.161	0.007	0.020	Bal.
4340	0.406	0.232	0.661	0.008	0.006	0.025	0.021	1.053	0.171	0.002	0.036	Bal.

Table 1 composition of raw material (%wt) Pin specimens

The AISI 1040, AISI 4140, and AISI 4340 which were presented the chemical composition in Table 1 (ASM v.1, 2005) were turned with a lathe into a Cylindrical shape sizing 5 mm-diameter and 16.5 mm-length. All the pins were taken to the heat treatment with 870 °C for 1 hr. Normalizing process for the sake of eliminate residual stress. Subsequent the heat treatment Process, the specimens' surface were cleaned with shot blasting with ball 0.3 diameter for 45 min (ASM V.5, 1987). Followed by the surface pretreatment, silicon carbide paper grit 2000 was used for grinding the cross-section area of pins.

Another vital part, disc material AISI D2 (the chemical composition in Table 2) was machined to 30 mm-diameter and 6 mm-thickness. The crucial variable of the disc is plane grinding to 0.1 μm -roughness (R_a) (ASTM G99-05)

AISI	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Fe
D2	1.43	0.166	0.226	11.95	0.629	0.738	Bal.

Table 2 composition of raw material (%wt) Disc

2.2 Heat treatment



Fig. 1 Treatment conditions of soft-nitriding method

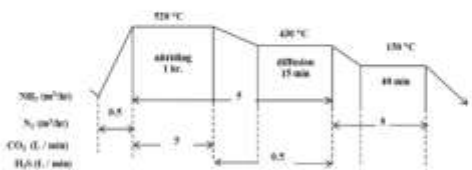


Fig. 2 Treatment conditions of sulfur-nitriding method

Upon completion of the preparation, all the specimens are separated into two groups. One for the gas soft-nitriding for 3 hr with 570 °C as shown in Fig. 1. And second group for gas sulfur-nitriding shown in Fig.2

2.3 Dry sliding (Pin-on-disc) tests



Fig. 3 Pin on disc apparatus

The experimental details Dry sliding friction were conducted on a pin-on-disc tester at a room temperature of about 23°C, and relative humidity of about 40% and disc diameter 30 mm thickness 6 mm and surface roughness (R_a) 0.1 μm were against with the steel pin diameter 5 mm. The friction test were carried out at a normal load of 5 N and sliding speed 0.1 m/s

3. Results and discussion

3.1 Surface hardness

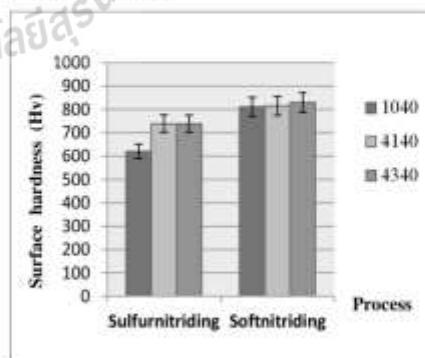


Fig. 4 Surface hardness of specimens

Fig. 4 shown surface hardness of specimens which treated by soft-nitriding and sulfur-nitriding in two process the trend of alloy steel (AISI 4140, AISI 4340) have higher surface hardness than plain carbon steel (AISI 1040). It is assumed that the chromium and molybdenum contained in the steels increased their hardness (Osamu, M., 1986) and from the result may suggest sulfur-nitriding have lower than soft-nitriding. We found from SEM report that the porous layer with irregularly shape particles was formed on the surface of gas sulfur-nitriding process. (Somsak Siwadamrongpong and Sirijit Champee, 2015) And found the compound layer thickness ($\text{Fe}_{2,3}\text{N}$, ϵ) in sulfur-nitriding process less than soft-nitriding process.

3.2 X-ray diffraction of the specimens

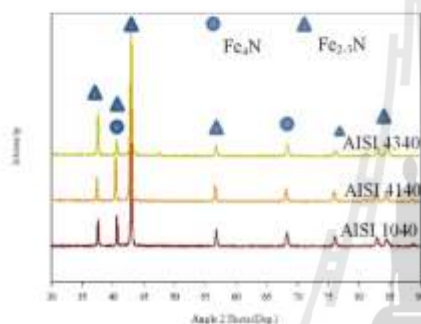


Fig. 5 X-ray diffraction patterns of sulfur-nitriding specimens

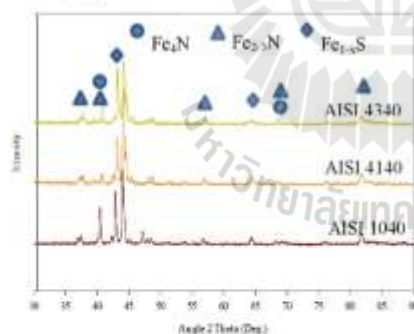


Fig. 6 X-ray diffraction patterns of sulfur-nitriding specimens

From the fig. 5-6 examination of the specimens that treated by gas soft-nitriding which analysis with XRD showed that Fe_4N (γ') and $\text{Fe}_{2,3}\text{N}$ (ϵ) in the Fig. 6 in the gas sulfur-nitriding process found the Fe_4N (γ') and the $\text{Fe}_{2,3}\text{N}$ (ϵ) too but we found Fe_{1-x}S in gas sulfur-nitriding process.

3.3 Dry sliding friction

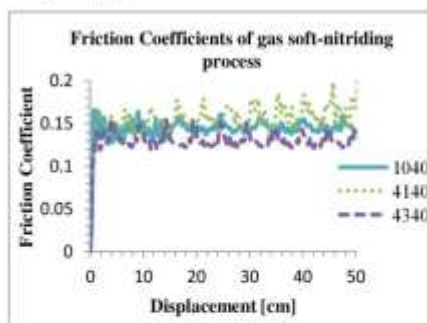


Fig. 7 Coefficients of friction against D2 disc of the soft-nitriding process

The dry sliding results of soft-nitriding as shown in Fig. 8 was found that the value of μ_k sort by ascending, AISI 4340 (0.129), AISI 1040 (0.143), AISI 4140 (0.154). Consistent with OM evidence that shows a most compound layer ($\text{Fe}_{2,3}\text{N}$) on AISI 4340 massively and X-ray diffraction indicate the compound layer consists ϵ phase was found.

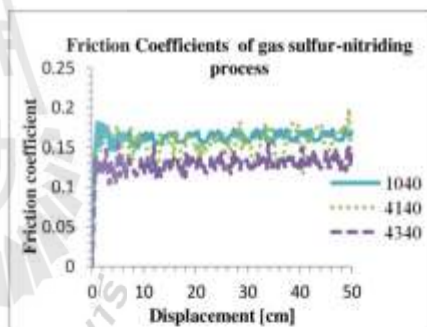


Fig. 8 Coefficients of friction against D2 disc of the sulfur-nitriding process

As well as Soft-nitriding, the Fig. 8 shown that the lowest μ_k value of AISI 4340 (0.128) is the most slippery material, and then AISI 4140 (0.152) and AISI 1040 (0.161) respectively. The AISI 4340 has most compound layer (composed of $\text{Fe}_{2,3}\text{N}$ and Fe_{1-x}S). For the trend of two processes AISI 4340 has most slippery material. This indicates that the ϵ -phase ($\text{Fe}_{2,3}\text{N}$) produced on the AISI 4340 has a significant effect on sliding friction coefficient.

4. Conclusion

The specimens AISI 1040, AISI 4140 and AISI 4340 were chosen in this study and the aimed to investigated influence of two process gas soft-nitriding and gas sulfur-nitriding to friction coefficient and propertied of specimens

Surface hardness result found that the alloy steel (AISI 4140, AISI 4340) has a good trend more than plain carbon steel

XRD (X-Ray diffraction) found that gas soft-nitriding process has Fe_3N (γ') and $Fe_{2,3}N$ (ϵ) in specimen while gas sulfur-nitriding process has the same Fe_3N (γ') and $Fe_{2,3}N$ (ϵ) and we found $Fe_{1-2}S$ in the specimen

Friction coefficient result found that in two processes AISI 4340 has lowest friction coefficient more than AISI 1040 and AISI 4140

5. Acknowledgements

The authors would like to thank Suranaree University of Technology for financial support and Thai Tokken Thermo Co., Ltd

REFERENCES

- Osamu Momose and Sosuke Uchida (1986). Gas sulphur nitriding steels in a CS_2 and NH_3 atmosphere. Tokai University, *Wear* 116 (1987) pp.19-24
- Wang lijie, Xing Yazhe, Wang hongbo, and Hao Jianmin (2009). Effect of nitriding-sulfurizing Composite treatment on tribological behavior of titanium alloys. *Rare materials* Vol.129 (2010) p.604
- Y.K. Ko, et al.,(2008). Plasma nitrosulfurizing techniques for low friction coefficient with H_2S and C_2H_6 gas addition, *Journal of surface Coatings Technology* 202 (2008) 5501-5504
- G. Nicoletto, A. Tucci, L. Esposito (1995). Sliding wear behavior of nitride and nitocarbided cast iron, *Wear* 197 (1996) pp. 38-44
- Wang lijie, Xing Yazhe, Wang hongbo, and Hao Jianmin (2009). Effect of nitriding-sulfurizing Composite treatment on tribological behavior of titanium alloys. *Rare materials* Vol.129 (2010) p.604
- B. Selcuk, R.Ipek, M.B. Karamis, V.Kuzucu (1999). An investigation on surface properties of treated low carbon and alloyed steels (boriding and carburizing), *Journal of Materials Processing Technology* 103 (2000) 310-317
- ASM Handbook., Heat Treating., Material Park Ohio.ASM International., Vol. 4, (1987)
- ASM Handbook., Surface engineering., Meterial Park Ohio.ASM International, Vol. 5, (1987)
- ASM Handbook., Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys., Meterial Park Ohio.ASM International, Vol. 5, (1987)
- Somsak Siwadamrongpong, Sirijit Champee (2015) Effect of gas sulfur-nitriding processes and gas soft-nitriding on the alloy and plain carbon steel.

B. Selcuk, R. Ipek, M.B. Karamis: A study on Friction and wear behavior of carburized, carbonitrided and borided AISI 1020 and 5115, *Journal of Materials Processing Technology* 141 (2003) 189-196



Somsak Siwadamrongpong received the B.E. (1995) degree in Mechanical Engineering from Chulalongkorn University, M.E. (2001) degree in Environmental System from Nagaoka University of Technology, and D.E. (2004) degree in Energy and Environment from Nagaoka University of Technology.

He is a Professor, Department of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology.



Sirijit Champee received the B.E. (2012) degree in Manufacturing Engineering for Suranaree University of Technology. She is a 2nd years of master degree in Manufacturing Engineering.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวศิริจิตร จำปี เกิดเมื่อวันที่ 28 ตุลาคม พ.ศ. 2531 ที่อำเภอเมือง จังหวัดอุตรธานี ศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนบ้านหมากแข้ง ชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายที่โรงเรียนอุตรพิทยานุกูล อำเภอเมือง จังหวัดอุตรธานี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ.2555 ในระหว่างการศึกษาระดับปริญญาตรีได้สหกิจศึกษา ณ ซีกเทท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ตำแหน่งผู้ช่วยวิศวกร เป็นเวลา 4 เดือน

ปี พ.ศ. 2555 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการผลิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้รับทุนการศึกษา “ทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอก”

ขณะที่ศึกษาต่อในระดับมหาบัณฑิตนั้น ได้มีประสบการณ์โดยเป็นผู้สอนในรายวิชาดังนี้

- 1) ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 1
- 2) ปฏิบัติการวิศวกรรมการผลิต 1,2,3
- 3) ปฏิบัติการวิศวกรรมยานยนต์ 2
- 4) การเขียนแบบวิศวกรรม 1

ในระหว่างการศึกษาระดับปริญญาโทได้นำเสนอผลงานทางวิชาการ 2 บทความ ตามที่ได้นำเสนอแสดงในภาคผนวก ก