

กรรมวิธีทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัส  
และนิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส ที่ชุบโดยไม่ใช้ไฟฟ้า

นายก่อเกียรติการ ธีรทัตพงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

HEAT TREATMENT AND MECHANICAL PROPERTIES OF ELECTROLESSLY-  
DEPOSITED NICKLE-PHOSPHORUS AND NICKLE-COBALT-PHOSPHORUS ALLOYS

Mr. Kongkidakarn Theeratatpong

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

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	กรรมวิธีทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัส และนิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส ที่ชุบโดยไม่ใช้ไฟฟ้า
โดย	นายก้องกิตติการ ชีรทัตพงษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไสว ด่านชัยวิจิตร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศศิริวงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไสว ด่านชัยวิจิตร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์)

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

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(อาจารย์ ดร. ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ)

ก้องกิตติการ ธีรทัตพงศ์: กรรมวิธีทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของชั้นเคลือบโลหะผสม นิกเกิล-ฟอสฟอรัส และนิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส ที่ชุบโดยไม่ใช้ไฟฟ้า (HEAT TREATMENT AND MECHANICAL PROPERTIES OF ELECTROLESSLY-DEPOSITED NICKLE-PHOSPHORUS AND NICKLE-COBALT-PHOSPHORUS ALLOYS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร. ไสว ด้านชัยวิจิตร, อ.ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ.ดร. ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์, 84 หน้า.

ผลของปริมาณโคบอลต์และอุณหภูมิของกรรมวิธีทางความร้อน ต่อค่าความแข็ง และความต้านทานการสึกหรอของโลหะผสมนิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส (Ni-Co-P) ได้ทำการศึกษา ถึงปริมาณโคบอลต์ในชั้นเคลือบอย่างเป็นระบบ จนกระทั่งมีปริมาณมากถึง 45% ด้วย กระบวนการชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้า โดยเมื่อผ่านกรรมวิธีทางความร้อนพบว่าการเพิ่มขึ้นของ ปริมาณโคบอลต์ในชั้นเคลือบทำให้ขนาดเกรนและโครงสร้างผลึกของวัสดุมีความเสถียรมากขึ้น ชั้นเคลือบ Ni-45Co-2.6P ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 300°C ให้ความแข็งสูงสุด 959 Hv<sub>0.1</sub> และมีการสึกหรอที่ต่ำ 8.85 mg/1000cycles ภายใต้การสึกหรอแบบขัดถู (abrasive wear) โดยการทดสอบด้วย Taber Abraser wear อย่างไรก็ตามการที่ไม่มีโคบอลต์ก็ทำให้ความต้านทาน การสึกหรอของโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสดีขึ้น ภายใต้การทดสอบด้วย ball-on-disc ซึ่งเกิดการ สึกหรอทั้งแบบขัดถูและแบบยึดติด (adhesive wear)

จากงานวิจัยนี้ทำให้ทราบว่าโลหะผสมนิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัสสามารถเพิ่มความแข็ง และความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูให้กับโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสได้ นอกจากนั้นการผ่าน กรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิเหมาะสมยังมีผลทำให้ชั้นเคลือบ Ni-45Co-2.6P มีสมบัติเชิงกลที่ ดีขึ้นด้วย

ภาควิชา .....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่ออนิสิต .....

สาขาวิชา .....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา ..... 2555..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

##5270213421: MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS: ELECTROLESS PLATING/ NICKEL ALLOYS/ THERMAL TREATMENT/  
MECHANICAL RESPONSE

KONGKIDAKARN THEERATATPONG: HEAT TREATMENT AND MECHANICAL  
PROPERTIES OF ELECTROLESSLY-DEPOSITED NICKLE-PHOSPHORUS AND  
NICKLE-COBALT-PHOSPHORUS ALLOYS. ADVISOR: ASST.PROF. SAWAI  
DANCHAIWIJIT,Ph.D., CO-ADVISOR: ASST.PROF. YUTTANANT  
BOONYONGMANEERAT,Ph.D., 84 pp.

The effects of cobalt content and heat treatment temperature on hardness and wear resistance of nickel-cobalt-phosphorus (Ni-Co-P) are systematically investigated on the electroless alloy deposits with cobalt contents up to 45%. The increase of the cobalt content leads to improved stabilizations of grain size and crystallographic structure under thermal annealing. Moderate annealing temperature of 300°C applied on Ni-45Co-2.6P deposits grants optimum hardness of 959 Hv<sub>0.1</sub> and relatively low wear loss of 8.85 mg/1000cycles under abrasive mode as assessed by Taber abraser wear test. An exclusion of cobalt however shows benefit in wear resistance enhancement under the ball-on-disc wear test which induces a combined abrasive and adhesive wear in this class of nickel-based alloys.

From this work, it has been found that Ni-Co-P alloys can enhance hardness and abrasive wear resistance of Ni-P based alloys. Moreover, suitable heat treatment temperature has effect in acquirement of better mechanical properties of Ni-45%Co-P coating.

Department: ....Metallurgical Engineering..... Student's Signature: .....

Field of Study: ..Metallurgical Engineering..... Advisor's Signature: .....

Academic Year: .....2012..... Co-advisor's Signature: .....

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับการช่วยเหลือจากหลายบุคคล ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไสว ด้านชัยวิจิตร และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์ เป็นอย่างสูง ที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือต่างๆ ตลอดจนเสียสละเวลาในการถ่ายทอดความรู้ และแนวทางการแก้ปัญหาในการศึกษาวิจัย นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล และอาจารย์ ดร. ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ในภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้คำแนะนำ และการสนับสนุนช่วยเหลือข้าพเจ้าด้วยดี

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้าพเจ้าในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง ตลอดจนคำแนะนำจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่ให้การสนับสนุน คำแนะนำ และกำลังใจในการทำงานตลอดเวลาที่ผ่านมาจนกระทั่งสำเร็จการศึกษาด้วยดี รวมทั้งกลุ่มวิจัย Poretege Research Group ที่สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเพื่อนนิสิตระดับปริญญาโทบัณฑิตในภาควิชาวิศวกรรมโลหการ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และให้กำลังใจข้าพเจ้าด้วยดีตลอดมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญภาพ .....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น .....	4
2.1 แนวคิดและทฤษฎี .....	4
2.1.1 เหล็กกล้าไร้สนิม .....	4
2.2.2 นิกเกิล .....	7
2.2.3 โคบอลต์ .....	8
2.2.4 การชุบเคลือบผิวแบบใช้ไฟฟ้า .....	9
2.2.5 การชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้า .....	14
2.2.6 แผนภูมิสมดุลเฟสของนิกเกิล-ฟอสฟอรัส .....	16
2.2.7 แผนภูมิสมดุลเฟสของโคบอลต์-ฟอสฟอรัส .....	17
2.2.8 หินเจีย .....	17

บทที่	หน้า
2.2.9 พฤติกรรมการสึกหรอของวัสดุ .....	21
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	23
3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง .....	39
3.1 เครื่องมือที่ใช้สำหรับทำงานวิจัย .....	39
3.2 ระเบียบวิธีการวิจัย .....	41
4 ผลการทดลองและการอภิปราย .....	46
4.1 การชุบเคลือบผิวแบบใช้ไฟฟ้า ด้วยวิธีนิกเกิลไฮดรอกไซด์ .....	46
4.2 การชุบเคลือบนิกเกิล-ฟอสฟอรัส และนิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส .....	47
4.2.1 ส่วนผสมทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนจำนวนโมล CoSO <sub>4</sub> / (CoSO <sub>4</sub> + NiSO <sub>4</sub> ) .....	47
4.2.2 ลักษณะของชั้นเคลือบที่มีปริมาณโคบอลต์แตกต่างกัน .....	49
4.2.3 การตรวจสอบขนาดเกรนและเฟสที่เกิดขึ้นของชั้นเคลือบ as-deposited .....	50
4.2.4 การตรวจสอบความแข็งของชั้นเคลือบ as-deposited .....	51
4.3 กรรมวิธีทางความร้อนของโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัส และนิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส ที่ชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า .....	51
4.3.1 ผลของกรรมวิธีทางความร้อนที่ 200°C .....	52
4.3.2 ผลของกรรมวิธีทางความร้อนที่ 300°C .....	52
4.3.3 ผลของกรรมวิธีทางความร้อนที่ 400°C .....	53
4.3.4 ผลของกรรมวิธีทางความร้อนที่ 500°C .....	54
4.4 ความแข็งของชั้นเคลือบนิกเกิล-ฟอสฟอรัส และนิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน .....	55



บทที่	หน้า
4.5 ความต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบนิกเกิล-ฟอสฟอรัส และนิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส .....	56
4.5.1 การทดสอบความต้านทานการสึกหรอด้วย ball-on-disc .....	57
4.5.2 การทดสอบความต้านทานการสึกหรอด้วย Taber abraser wear .....	63
4.6 การผลิตหินเจียด้วยวิธีการชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้า .....	73
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	74
รายการอ้างอิง .....	76
ภาคผนวก .....	80
ภาคผนวก ก .....	81
ภาคผนวก ข .....	83
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	84

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรในการชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้า และกรรมวิธีทางความร้อน .....	44
ตารางที่ 4.1 การทดลองและส่วนผสมทางเคมีของชั้นเคลือบนิกเกิล-ฟอสฟอรัส และนิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส .....	47
ตารางที่ 4.2 ขนาดเกรนของชั้นเคลือบนิกเกิล-ฟอสฟอรัส และนิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส ...	50
ตารางที่ 4.3 พื้นที่เฉลี่ยการสึกหรอและปริมาตรการสึกหรอของชั้นเคลือบ As-deposited .....	60
ตารางที่ 4.4 พื้นที่เฉลี่ยการสึกหรอและปริมาตรการสึกหรอของชั้นเคลือบ .....	67
ตารางที่ 4.5 ค่าความหยาบผิว ปริมาตรการสึกหรอ และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชั้นเคลือบ .....	71
ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบ Taber Abraser wear .....	82

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 แผนภูมิสมดุลเฟสของนิกเกิล-ฟอสฟอรัส .....	16
ภาพที่ 2.2 แผนภูมิสมดุลเฟสของโคบอลต์-นิกเกิล .....	17
ภาพที่ 2.3 การชุบเคลือบผิวแบบ Electroplating .....	20
ภาพที่ 2.4 การเคลือบผิวแบบ Brazed .....	20
ภาพที่ 2.5 การสึกหรอแบบ abrasive wear ในแบบต่างๆ .....	21
ภาพที่ 2.6 การสึกหรอแบบ adhesive wear ของวัสดุโลหะกับโลหะ .....	22
ภาพที่ 2.7 กลไกการเกิดสึกหรอแบบ fatigue wear .....	23
ภาพที่ 2.8 XRD pattern ของชั้นเคลือบที่ชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าด้วยนิกเกิล-ฟอสฟอรัส ที่มีปริมาณฟอสฟอรัสแตกต่างกัน .....	24
ภาพที่ 2.9 ภาพถ่ายจาก TEM และ Selected Area Electron Diffraction (SADE) patterns ของชั้นเคลือบ as-deposited นิกเกิล-ฟอสฟอรัส .....	24
ภาพที่ 2.10 ผลของปริมาณฟอสฟอรัสที่แตกต่างกันต่อค่าความแข็งของชั้นเคลือบ as-deposited นิกเกิล-ฟอสฟอรัส .....	25
ภาพที่ 2.11 ความต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบที่มีปริมาณฟอสฟอรัสแตกต่างกัน .....	26
ภาพที่ 2.12 ลักษณะโครงสร้างของชั้นเคลือบ as-deposited นิกเกิล-ฟอสฟอรัส ที่มีปริมาณ ฟอสฟอรัส 4.37 wt% .....	27
ภาพที่ 2.13 ปริมาตรที่สูญเสียไปหลังจากทดสอบการสึกหรอของชั้นเคลือบนิกเกิล-ฟอสฟอรัส ที่มีปริมาณฟอสฟอรัส และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน .....	27
ภาพที่ 2.14 ความแข็งของชั้นเคลือบนิกเกิล-ฟอสฟอรัส ที่มีปริมาณฟอสฟอรัส และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน .....	28
ภาพที่ 2.15 XRD pattern ของชั้นเคลือบฟอสฟอรัสน้อย (3.9 wt%P) หลังจากอบอ่อน ที่อุณหภูมิ 300°C 400°C และ 500°C นาน 1 ชั่วโมง .....	29
ภาพที่ 2.16 ค่าความแข็งของชิ้นงานตัวอย่างที่ทำการทดลอง .....	30

ภาพที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และระยะทางทดสอบ การสึกหรอ .....	31
ภาพที่ 2.18 แสดง track depth profiles ของชิ้นงานที่ทดสอบความต้านทานการสึกหรอ ด้วยเครื่อง pin-on-disc ระยะทาง 1040 เมตร .....	32
ภาพที่ 2.19 การสึกหรอของชิ้นงานที่ทดสอบด้วยเครื่อง pin-on-disc .....	32
ภาพที่ 2.20 แสดงค่าความแข็งของชั้นเคลือบซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณโคบอลต์ .....	33
ภาพที่ 2.21 อัตราส่วน $\text{CoSO}_4 / (\text{CoSO}_4 + \text{NiSO}_4)$ ที่ส่งผลต่ออัตราการเคลือบ .....	34
ภาพที่ 2.22 อัตราส่วน $\text{CoSO}_4 / (\text{CoSO}_4 + \text{NiSO}_4)$ ที่ส่งผลต่อส่วนผสมของชั้นเคลือบ .....	34
ภาพที่ 2.23 XRD pattern ของอัตราส่วน $\text{CoSO}_4 / (\text{CoSO}_4 + \text{NiSO}_4)$ เป็น 0.3 (a), 0.5 (b), 0.7 (c) .....	35
ภาพที่ 2.24 แผนผังของการเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสของชั้นเคลือบนิเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส เมื่อผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ $300^\circ\text{C}$ , $400^\circ\text{C}$ และ $>400^\circ\text{C}$ .....	36
ภาพที่ 2.25 น้ำหนักของชั้นเคลือบที่สูญเสียไปเมื่อทดสอบการสึกหรอที่เวลาต่างๆ .....	36
ภาพที่ 2.26 XRD pattern ของชั้นเคลือบนิเกิล-ฟอสฟอรัส/ผงเพชร แบบ as-deposited และผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ทั้งก่อนและหลังทดสอบการสึกหรอ .....	37
ภาพที่ 3.1 กรรมวิธีทางความร้อนของชั้นเคลือบที่ชุบแบบไม่ใช่ไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ .....	43
ภาพที่ 4.1 ภาพตัดขวางของชั้นเคลือบที่ชุบแบบไม่ใช่ไฟฟ้า .....	46
ภาพที่ 4.2 ปริมาณธาตุผสมที่เปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนจำนวนโมลของ $\text{CoSO}_4 / (\text{CoSO}_4 + \text{NiSO}_4)$ .....	48
ภาพที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบที่ชุบแบบไม่ใช่ไฟฟ้า (ก) NP, (ข) NCP1, (ค) NCP3, (ง) NCP5 และ (จ) NCP7 .....	49
ภาพที่ 4.4 XRD pattern ของ NP, NCP1, NCP3, NCP5 และ NCP7 .....	50
ภาพที่ 4.5 ความแข็งของชั้นเคลือบ as-deposited .....	51
ภาพที่ 4.6 การคำนวณหาพื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ .....	52

ภาพที่ 4.7 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ NP (ก) แบบ 2 มิติ และ (ข) แบบ 3 มิติ .....	53
ภาพที่ 4.8 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ NCP1 (ก) แบบ 2 มิติ และ (ข) แบบ 3 มิติ .....	54
ภาพที่ 4.9 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ NCP3 (ก) แบบ 2 มิติ และ (ข) แบบ 3 มิติ .....	55
ภาพที่ 4.10 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ NCP5 (ก) แบบ 2 มิติ และ (ข) แบบ 3 มิติ .....	56
ภาพที่ 4.11 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ NCP7 (ก) แบบ 2 มิติ และ (ข) แบบ 3 มิติ .....	57
ภาพที่ 4.12 ปริมาตรการสึกหรอของชั้นเคลือบ As-deposited .....	58
ภาพที่ 4.13 พื้นผิวร่องของชั้นเคลือบ (ก) NP, (ข) NCP1, (ค) NCP3, (ง) NCP5, (จ) NCP7 ที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอ .....	58
ภาพที่ 4.14 XRD pattern ของ NP, NCP1, NCP3, NCP5 และ NCP7 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 200°C .....	59
ภาพที่ 4.15 XRD pattern ของ NP, NCP1, NCP3, NCP5 และ NCP7 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 300°C .....	59
ภาพที่ 4.16 XRD pattern ของ NP, NCP1, NCP3, NCP5 และ NCP7 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 400°C .....	60
ภาพที่ 4.17 XRD pattern ของ NP, NCP1, NCP3, NCP5 และ NCP7 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 500°C .....	61
ภาพที่ 4.18 ความแข็งของ NP, NCP1, NCP3, NCP5 และ NCP7 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 200°C, 300°C, 400°C และ 500°C .....	62
ภาพที่ 4.19 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชั้นเคลือบ as-deposited NP, NCP7, heat treatment NP' และ NCP7' .....	63
ภาพที่ 4.20 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ as-deposited NP (ก) แบบ 2 มิติ และ (ข) แบบ 3 มิติ .....	64
ภาพที่ 4.21 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ as-deposited NCP7 (ก) แบบ 2 มิติ และ (ข) แบบ 3 มิติ .....	65

ภาพที่ 4.22 พื้นผิวการสึกหรอของชั้นเคลือบ Heat treatment NP	
(ก) แบบ 2 มิติ และ (ข) แบบ 3 มิติ .....	65
ภาพที่ 4.23 พื้นผิวการสึกหรอของชั้นเคลือบ Heat treatment NCP7	
(ก) แบบ 2 มิติ และ (ข) แบบ 3 มิติ .....	66
ภาพที่ 4.24 แสดงการสึกหรอของชั้นเคลือบที่ผ่านการทดสอบ ball-on-disc .....	66
ภาพที่ 4.25 พื้นผิวร่องการสึกหรอของชั้นเคลือบ as-deposited (ก) NP, (ข) NCP7,	
heat treatment (ค) NP, (ง) NCP7 และ (จ) การแตกหักแบบเปราะของ NCP7..	68
ภาพที่ 4.26 การทดสอบความหยาบผิวด้วยเครื่อง Atomic Force Microscopy (AFM) .....	70
ภาพที่ 4.27 พื้นผิวร่องของชั้นเคลือบที่ผ่านการทดสอบ Taber Abraser wear ชั้นเคลือบ	
(ก) as-deposited NP, (ข) NCP7, (ค) heat treatment NP และ (ง) NCP7 .....	72
ภาพที่ 4.28 ผลการทดสอบ Taber wear ของชั้นเคลือบ as-deposited NP, NCP7	
และ heat treatment NP ' , NCP7 ' .....	72

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

กระบวนการปรับปรุงผิววัสดุมีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มความสวยงาม ความแข็ง สมบัติทางแสงหรือไฟฟ้า ป้องกันการกัดกร่อน หรือป้องกันการสึกหรอให้กับวัสดุพื้น แล้วแต่ความต้องการในการใช้งาน โดยสามารถแบ่งวิธีการปรับปรุงผิวออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ 1.surface treatment เช่น การชุบโรซิง ไนไตรดิง การฝังอิออน และการปรับปรุงผิวด้วยเลเซอร์ 2.surface coating เช่น การเคลือบไอทางกายภาพ การเคลือบไอทางเคมี และการเคลือบผิวแบบสเปรย์ร้อน นอกจากนี้การชุบเคลือบผิว (electroplating) ก็เป็นวิธีหนึ่งที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถเลือกใช้วัสดุพื้นและวัสดุที่ใช้เคลือบได้หลากหลาย ชั้นเคลือบมีความสวยงาม มีสมบัติทางกลที่ดี และสามารถชุบเคลือบผิวแบบโลหะผสมได้

การชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้า (electroless) ด้วยนิกเกิลและฟอสฟอรัส มีการใช้งานกันอย่างมากในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากให้ชั้นเคลือบที่มีความแข็งแรงสูง มีความต้านทานการสึกหรอ และต้านทานการกัดกร่อนที่สูง โดยสมบัติดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับปริมาณฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในชั้นเคลือบ ซึ่งมีผลทำให้โครงสร้างจุลภาคมีขนาดที่เล็กลงเมื่อมีฟอสฟอรัสมากขึ้น ในอุตสาหกรรมมีการใช้งานชั้นเคลือบที่มีปริมาณฟอสฟอรัสอยู่ในช่วง 3-14 wt% โดยสามารถแบ่งปริมาณฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในชั้นเคลือบออกได้ 3 กลุ่ม คือ 1.ฟอสฟอรัสน้อย ( $\leq 5$  wt%) ชั้นเคลือบจะมีโครงสร้าง nanocrystalline และอาจจะมีโครงสร้างอสัณฐาน (amorphous) เกิดขึ้นได้ 2. ฟอสฟอรัสปานกลาง (5-8 wt%) มีโครงสร้างเป็น nanocrystalline และ amorphous 3.ฟอสฟอรัสมาก ( $\geq 9$  wt%) มีโครงสร้าง amorphous และถ้านำชั้นเคลือบที่ได้ไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ประมาณ  $400^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง จะให้ความแข็งแรงสูงสุด [1,2] เนื่องจากเกิดสารประกอบเชิงโลหะชนิด  $\text{Ni}_3\text{P}$  ซึ่งมีความแข็งแรงที่สูงอยู่ในโครงสร้างพื้นนิกเกิล จึงช่วยให้ชั้นเคลือบมีความต้านทานการสึกหรอที่สูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ชั้นเคลือบนิกเกิลและฟอสฟอรัสที่มีการเติมธาตุที่ 3 เช่น โคบอลต์ ทังสเทน หรือเหล็ก เป็นต้น ยังพบว่าช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้สูงขึ้นด้วย [3-5] และการเพิ่มความต้านทานการสึกหรอให้สูงมากยิ่งขึ้นสามารถใส่ผงเพชรหรือผงเซรามิกเข้าไปในการชุบเคลือบผิวได้ เพื่อนำชั้นเคลือบที่ได้กล่าวมานั้น ไปใช้ในการขัดสีวัสดุอื่นที่มีความแข็งน้อยกว่า นั่นคือสามารถนำไปผลิตเป็นหินเจียรได้

ปัจจุบันนี้การผลิตหินเจียรด้วยวิธีการชุบเคลือบผิวมีการใช้งานกันมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตด้วยวิธีอื่น ได้แก่ vitrified bond, resin bond และ metal bond wheels ซึ่งหินเจียรที่ได้จากการชุบเคลือบผิวสามารถนำไปใช้เจียรเลนส์ หรือวัสดุที่มีลักษณะเป็น profile และใช้เจียรหินเจียรประเภทอื่นที่ต้องการผิวที่มีความโค้ง ซึ่งหินเจียรที่ผลิตด้วยวิธีอื่นเมื่อนำไปใช้เจียรแล้วตัวหินเจียรเกิดการสึกหรอ ถ้านำไปใช้เจียรครั้งต่อไปจะทำให้ชิ้นงานไม่ได้ขนาดที่ต้องการ จึงจำเป็นต้องใช้หินเจียรอันใหม่ทำให้สูญเสียหินเจียรส่วนที่เหลือไป แต่ชั้นเคลือบของหินเจียรที่ได้จากการชุบเคลือบมีข้อดีที่มีลักษณะเป็น single layer เมื่อใช้งานแล้วเกิดการสึกหรอก็สามารถเปลี่ยนใหม่โดยสูญเสียผงขัด (Abrasives) และวัสดุยึดผงขัด (Bond) ในปริมาณที่น้อยกว่า นอกจากนี้ยังสามารถนำวัสดุพื้นที่ใช้ทำหินเจียรกลับมาชุบเคลือบผิวใหม่ได้ จึงลดค่าใช้จ่ายด้านวัสดุ และสามารถใช้งานผงขัดได้คุ้มค่างว่าการผลิตด้วยวิธีอื่นๆ

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาวิธีชุบเคลือบผิวในการผลิตหินเจียร ซึ่งการผลิตด้วยวิธีดังกล่าวยังมีการศึกษาวิจัยไม่มากนัก และยังมีการศึกษาเกี่ยวกับชั้นเคลือบนิเกิล-ฟอสฟอรัส-โคบอลต์ ที่เกี่ยวข้องกับกรรมวิธีทางความร้อน และสมบัติทางกล ได้แก่ ความแข็ง และการทดสอบการสึกหรอ โดยชั้นเคลือบที่ใช้ผลิตหินเจียรนั้นต้องการสมบัติด้านความแข็ง ความต้านทานการสึกหรอที่สูง มีการยึดติดของชั้นเคลือบกับวัสดุพื้นและผงเพชรที่ดี ซึ่งการใช้งานหินเจียรจำเป็นต้องสัมผัสกับสารหล่อเย็น สารหล่อลื่น หรือน้ำ จึงเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุพื้น (Substrate) ดังนั้นวัสดุพื้นจึงจำเป็นต้องผ่านการชุบเคลือบผิวแบบใช้ไฟฟ้า (Electrodeposition) ด้วยวิธีนิเกิลสไตรค์ก่อน และจึงชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้าเป็นชั้นเคลือบชั้นนอกสุด เพราะว่าการชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้ามีความสามารถในการยึดติดกับวัสดุพื้นที่ดี แต่มีสมบัติทางกล และความสม่ำเสมอของชั้นเคลือบที่ดีกว่าการชุบเคลือบผิวแบบใช้ไฟฟ้า จึงสามารถเคลือบผิวชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้ดี

การทดลองจะเลือกใช้ชั้นเคลือบนิเกิลที่มีปริมาณฟอสฟอรัสผสมอยู่น้อย เนื่องจากมีสมบัติด้านความต้านทานการสึกหรอที่สูง และเลือกใช้โคบอลต์เป็นธาตุที่ 3 ใส่ลงไปในชั้นเคลือบนิเกิล-ฟอสฟอรัส ในปริมาณที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาผลของปริมาณธาตุผสมต่อค่าความแข็ง ความต้านทานการสึกหรอ นอกจากนี้ชั้นเคลือบทั้งหมดจะนำไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่  $200^{\circ}\text{C}$  ถึง  $500^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อค่าความแข็งและความต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบ



## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้าด้วยนิกเกิล-ฟอสฟอรัส และนิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส ที่ส่งผลต่อส่วนประกอบทางเคมี โครงสร้างจุลภาค ความแข็ง และความต้านทานการสึกหรอของชิ้นเคลือบ
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ใช้ในกรรมวิธีทางความร้อน ที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค เฟสของสารประกอบที่เกิดขึ้น ความแข็ง และความต้านทานการสึกหรอของชิ้นเคลือบที่ชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. การทดลองชุบเคลือบผิวใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 เป็นวัสดุพื้น
2. การทดลองชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้าโดยใช้นิกเกิล-ฟอสฟอรัส และนิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส ใช้อุณหภูมิ และเวลาเท่ากัน
3. กรรมวิธีทางความร้อนใช้อุณหภูมิ 200°C 300°C 400°C และ 500°C เวลา 1 ชั่วโมง
5. ศึกษาสมบัติด้านความแข็ง และความต้านทานการสึกหรอ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจถึงกระบวนการชุบเคลือบผิวทั้งแบบใช้ไฟฟ้า และไม่ใช้ไฟฟ้า
2. สามารถทำนาย และควบคุมโครงสร้างจุลภาคของชิ้นเคลือบที่ผ่านการชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าด้วยนิกเกิล-ฟอสฟอรัส และนิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัสได้
3. เข้าใจถึงปริมาณฟอสฟอรัส และโคบอลต์ ที่ส่งผลต่อค่าความแข็ง และความต้านทานการสึกหรอของชิ้นเคลือบทั้งก่อนและหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน
4. สามารถนำความรู้ที่ได้จากการศึกษาไปประยุกต์ใช้กับการชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้าด้วยธาตุอื่นๆ และสามารถผลิตชิ้นเคลือบที่มีความแข็ง และต้านทานการสึกหรอที่สูงได้

## บทที่ 2

### การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

#### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

การศึกษางานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้การชุบเคลือบผิวในการผลิตและพัฒนา หินเจียร โดยมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ประเภทของหินเจียรที่มีการใช้งาน การชุบเคลือบผิวแบบใช้ ไฟฟ้า และแบบไม่ใช้ไฟฟ้า กรรมวิธีทางความร้อน เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบสมบัติของชั้น เคลือบ รวมทั้งสมบัติต่างๆของวัสดุที่เลือกนำมาใช้ในการทดลอง

##### 2.1.1 เหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กโดยทั่วไปจะเกิดสนิมได้ง่ายในบรรยากาศที่มีความชื้น การเกิดสนิมจะเกิดต่อไปเรื่อยๆ และสนิมจะเกิดหนาขึ้นเรื่อยๆ ยิ่งถ้าเหล็กอยู่ในน้ำก็จะเป็นสนิม หรือผุกร่อนไปได้ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical) เพราะเหล็กมีความเป็นแอโนด (Anodic) สูง

แต่ถ้าผสมธาตุโครเมียมในเหล็กให้มีปริมาณสูง เหล็กจะมีสมบัติต้านทานต่อการเกิดสนิม ได้มากขึ้น จนกระทั่งไม่เกิดสนิมแม้จะอยู่ในน้ำหรือในสารละลายที่เป็นกรดเจือจาง กล่าวได้ว่า เหล็กผสมโครเมียมมีคุณสมบัติเป็น Anodic ลดลง หรือมี Cathodic มากขึ้น ซึ่งเหล็กที่มี คุณสมบัติดังกล่าวนี้เรียกว่า เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)

โครเมียมเป็นธาตุที่สำคัญในเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งโครเมียมมี Anodic สูงกว่าไฮโดรเจน เนื่องจากไฮโดรเจนอยู่ตรงกลางระหว่าง Anodic และ Cathodic คือมีค่า Electropotential เป็น ศูนย์ โครเมียมมีคุณสมบัติที่พิเศษ คือเมื่ออยู่ในกรดไนตริก หรือกรดโครมิก ในตอนแรกจะมีสมบัติ เป็น Anodic แต่พอทิ้งไว้ไม่นานจะกลับกลายเป็น Cathodic ซึ่งมีค่า Electropotential ไปทางด้าน Cathodic ประมาณ 0.8-0.9 โวลต์ ทำให้ไม่เกิดการผุกร่อนต่อไป คุณสมบัติเช่นนี้เรียกว่า Passivity หรือ Passive state ที่เป็นเช่นนั้นเพราะโครเมียมเมื่อรวมกับออกซิเจนจะเกิดเป็นโครเมียม ออกไซด์ ซึ่งเป็นฟิล์มที่เกาะติดแน่นและมีความหนาแน่นสูงจนเป็นเสมือนเกราะป้องกันไม่ให้

อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่าน หรือผ่านได้น้อยลง ทำให้ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเกิดได้ยากขึ้น การผูกก่อนจึงเกิดขึ้นน้อยลง

เมื่อผสมโครเมียมในเหล็กจะพบว่าต้องมีโครเมียมมากกว่า 12% ประมาณ 1 อะตอมโครเมียม ต่อ 7 อะตอมของเหล็ก จึงจะให้คุณสมบัติ Passivity ได้ ซึ่งในเหล็กทั่วไปจะมีคาร์บอนผสมอยู่ เมื่อผสมโครเมียมลงไปทำให้เกิดโครเมียมคาร์ไบด์เพราะโครเมียมเป็นธาตุที่รวมกับคาร์บอนได้ดี ดังนั้นจะผสมโครเมียมตั้งแต่ 15-18% เพื่อให้มีปริมาณโครเมียมมากกว่า 12% แม้ว่าจะเสียโครเมียมไปรวมกับคาร์บอนบ้างก็ตาม [6]

เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีการใช้งานกันมากที่สุดคือเกรด 18-8 มีธาตุผสมเป็นโครเมียม 18% และมีนิกเกิล 8% ซึ่งเกรดนี้เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก นอกจากนี้แล้วยังสามารถแบ่งเหล็กกล้าไร้สนิมออกได้อีกหลายกลุ่มขึ้นอยู่กับปริมาณโครเมียม และขึ้นอยู่กับโครงสร้าง ได้แก่ เฟอร์ริติก ออสเทนนิติก มาร์เทนซิติก ดูเพล็กซ์ และกลุ่มเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกผลึก

กลุ่มเฟอร์ริติก (Ferritic stainless steel) เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีโครเมียมเป็นธาตุผสมหลักอยู่ประมาณ 11.5%-27% มีแมงกานีส และซิลิกอนผสมอยู่ด้วย ในบางเกรดจะมีการใส่นิกเกิล อะลูมิเนียม โมลิบดีนัม หรือไทเทเนียม ส่วนคาร์บอนจะมีอยู่ในปริมาณน้อยเพื่อเพิ่ม toughness และลดการเกิด sensitization ซึ่งเกิดจากการตกผลึกของโครเมียมคาร์ไบด์ เนื่องจากกลุ่มนี้มีปริมาณคาร์บอนต่ำจึงทำให้มี strength ที่ไม่สูงมากนัก เมื่อผ่านการอบอ่อนมีค่า yield strength ประมาณ 275-415 MPa เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกมีการนำมาใช้งานเพราะมีความต้านทานต่อการเกิดการกัดกร่อนในของเหลวทั่วไป และต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงได้ดี มีความสามารถในการขึ้นรูปเย็นได้ดี ต้านทานต่อการเกิด pitting และ stress corrosion cracking นอกจากนี้โดยทั่วไปแล้วจะมีราคาถูกกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดออสเทนนิติก

เกรดที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเกรด 430 ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีดังนี้ คาร์บอน 0.12% แมงกานีส 1.00% ฟอสฟอรัส 0.040% ซัลเฟอร์ 0.030% ซิลิกอน 1.00% โครเมียม 16.00-18.00% โมลิบดีนัม 0.60%

กลุ่มมาร์เทนซิติก (Martensitic stainless steel) แตกต่างจากกลุ่มเฟอร์ริติกตรงที่จะมีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่มากกว่า โดยทั่วไปจะมีโครเมียม 12-18% และคาร์บอน 0.12-1.20% เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้จะถูกให้ความร้อนจนมีโครงสร้างเป็นออสเทนไนท์ และถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ภายหลังจากการชุบแข็ง และอบคืนตัวจะมี yield strength อยู่ในช่วง 550-1860 MPa ซึ่งการที่มีโครเมียมผสมอยู่มากทำให้เหล็กกล้ามีความสามารถในการชุบแข็งที่สูง และเพื่อให้มีความแข็งแรงที่สูงภายหลังการชุบแข็ง การอบชุบทางความร้อนเหล็กต้องมีปริมาณเฟอร์ไรต์น้อยที่สุด

กลุ่มดูเพล็กซ์ (Duplex stainless steel) เหล็กกล้าไร้สนิมเกรดนี้มีโครงสร้างประกอบด้วยเฟอร์ไรต์ และออสเทนไนท์ กลุ่มนี้มีจุดเด่นตรงที่มี yield strength มากกว่ากลุ่มออสเทนนิติก มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดีพอกับกลุ่มออสเทนนิติก มีความต้านทานต่อ stress corrosion cracking มีความสามารถในการเชื่อมที่ดี และไม่เกิดปัญหาด้านการกัดกร่อนตามขอบเกรน แต่มีข้อด้อยตรงที่สามารถเกิดเฟส  $\alpha'$  และ  $\sigma$  ซึ่งเป็นเฟสที่มีความเปราะทำให้เหล็กขึ้นรูปร้อนได้ยาก

กลุ่มออสเทนนิติก (Austenitic stainless steel) มีโครเมียมผสมอยู่ 16-25% และมีนิกเกิล แมงกานีส หรือไนโตรเจน ผสมอยู่ด้วยเพื่อให้เกิดออสเทนไนท์ที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากเฟสออสเทนไนท์มีโครงสร้าง fcc ทำให้เหมาะกับงานที่ไม่ต้องการสมบัติทางแม่เหล็ก และยังมีความแกร่งที่อุณหภูมิต่ำ การที่มีโครงสร้างจุลภาคที่เป็นเฟสเดียวทำให้มี yield strength ที่ต่ำ แต่สามารถทำให้แข็งแรงขึ้นด้วยการขึ้นรูปเย็น หรือการเติมธาตุผสมเพื่อให้เกิด solid solution ข้อด้อยของกลุ่มนี้คือมีราคาแพง และเกิด stress corrosion cracking ได้ง่าย

กลุ่มเพิ่มความแข็งแรงโดยวิธีการตกผลึก (Precipitation-hardened stainless steel) เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้สามารถผลิตให้มีโครงสร้างพื้น (Matrix) เป็นออสเทนไนท์ หรือมาเทนไซต์ก็ได้ เกรดที่มีโครงสร้างพื้นเป็นออสเทนไนท์เหมาะกับงานที่ไม่ต้องการสมบัติด้านแม่เหล็ก ส่วนผสมจะมีนิกเกิลอย่างน้อย 10% หรือใช้นิกเกิลและแมงกานีสร่วมกัน เพื่อให้ได้ออสเทนไนท์ที่อุณหภูมิห้อง ส่วนธาตุที่เติมลงไปเพื่อให้เกิดการตกผลึกได้แก่ ฟอสฟอรัส โมลิบดีนัม ทองแดง ไนโอเบียม หรือไทเทเนียม โลหะผสมจะถูกอบไปที่ประมาณ 1200°C และทำให้เย็นตัวอย่าง

รวดเร็ว หลังจากนั้นจะนำไปทำ aging ที่อุณหภูมิ 700-800°C จะทำให้มี yield strength ประมาณ 700 Mpa [7]

## 2.1.2 นิกเกิล

นิกเกิล (Nickel) สัญลักษณ์ธาตุคือ Ni เป็นโลหะที่มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันและการกัดกร่อนสูง เป็นโลหะที่มีสีขาวสวยงาม มีความเหนียวและอ่อนตัวสูงสามารถขึ้นรูปเย็นได้ง่าย นอกจากนี้นิกเกิลสามารถละลายกับโลหะอื่นได้ง่ายและให้สารละลายของแข็งที่มีความเหนียว ประมาณ 60% ของนิกเกิลจะใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าผสม ส่วนที่เหลือจะใช้ทำโลหะนิกเกิลผสมที่ใช้ในงานพิเศษที่ทนการกัดกร่อนสูงๆ และใช้เคลือบผิวเหล็ก (Electroplating) โดยอาศัยสมบัติด้านทนต่อการกัดกร่อนและให้สารละลายของแข็งได้ง่าย เมื่อพิจารณาคุณสมบัติเชิงกลจะพบว่ามีความแข็งแรงเทียบเท่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ แต่ที่เหนือกว่าคือสามารถรักษาความเหนียวได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำ สมบัติตัวนำไฟฟ้าของนิกเกิลจะสูงไม่เท่าทองแดงและอะลูมิเนียม แต่ก็สูงพอที่จะใช้ได้บางกรณีที่ขั้วสายหรือเทอร์มินอลในงานอิเล็กทรอนิกส์ ในบรรยากาศใช้งานถ้ามีแก๊สของกำมะถันอยู่ด้วยจะมีส่วนทำให้นิกเกิลขาดความต้านทานที่ดี และบางทีอาจจะเปราะแตกง่าย ส่วนใหญ่ไม่นิกเกิลในสภาพโลหะบริสุทธิ์ เพราะนิกเกิลมีราคาสูงเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่นๆ จะใช้ในลักษณะโลหะผสม และเฉพาะกรณีที่มีความจำเป็นเพื่ออาศัยคุณสมบัติพิเศษของนิกเกิลเท่านั้น [8]

### สมบัติทางฟิสิกส์

ระบบผลึก	FCC (Face center cubic)
น้ำหนักอะตอม	58.69 g/mol
ความหนาแน่น (Room temperature)	8.89 g/cm <sup>3</sup>
อุณหภูมิหลอมเหลว	1435-1455 °C
จุดเดือดกลายเป็นไอ	2730 °C
ความร้อนจำเพาะ (27-100°C)	0.13 cal/g °C
ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย	73.8 cal/g

สัมประสิทธิ์การขยายตัว (27-100 °C)	$13 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (20 °C)	9.5 microhm-cm
สัมประสิทธิ์ตัวนำความร้อน (27-100 °C)	0.145 cal-cm/cm <sup>2</sup> ·s·°C

#### สมบัติทางกล

ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength)	47 kg/mm <sup>2</sup>
พิกัดความยืดหยุ่น (Elastic limit)	15 kg/mm <sup>2</sup>
อัตราการยืดตัว (Percent elongation)	40%
ความแข็ง (Hardness)	110 HB.
โมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)	21000 kg/mm <sup>2</sup>

### 2.1.3 โคบอลต์

โคบอลต์ (Cobalt) สัญลักษณ์ธาตุคือ Co แร่โคบอลต์เป็นแร่ที่พบน้อย ส่วนมากจะอยู่ร่วมกับแร่ทองแดงและนิกเกิล แร่ที่สำคัญได้แก่แร่ Cobalt bloom ( $3\text{CoO}\cdot\text{AS}_2\text{O}_5$ ) แร่ Cobaltite ( $\text{CoAsS}$ ) และแร่ Smaltite ( $\text{CoAs}_2$ ) โลหะโคบอลต์ที่ผลิตส่วนใหญ่จะเป็นผลพลอยได้จากการถลุงแร่นิกเกิลและทองแดง โคบอลต์ถูกนำมาใช้มากในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าความเร็วสูง (High speed steel) ซึ่งเป็นเหล็กกล้าที่มีความแข็งและทนความร้อนได้สูง ใช้ทำเครื่องมือตัดโลหะ นอกจากนี้โคบอลต์ยังมีบทบาทในการปรับปรุงคุณภาพเหล็กกล้าชนิดอื่นๆ อีก เช่น เหล็กกล้าพิเศษที่เรียกว่า Maraging ผสมโคบอลต์ประมาณ 8-9% เป็นเหล็กกล้าที่มีคุณสมบัติทั้งความแข็งแรงและมีความเหนียวสูง นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาโลหะผสมโคบอลต์สำหรับใช้งานกรณีพิเศษ เช่น ทำโลหะทนความร้อน (Refractory metal) ทำแม่เหล็กถาวร และโลหะทนการกัดกร่อนพิเศษ [8]

#### สมบัติทางฟิสิกส์

ระบบผลึก	HCP (Hexagonal close packed)
	ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 471 °C
	FCC (Face centered cubic)
	ที่อุณหภูมิสูงกว่า 471 °C

น้ำหนักอะตอม	58.94	g/mol
ความหนาแน่น (Room temperature)	8.90	g/cm <sup>3</sup>
อุณหภูมิหลอมเหลว	1493	°C
จุดเดือดกลายเป็นไอ	3100	°C
ความร้อนจำเพาะ (0-100°C)	0.105	cal/g °C
ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย	62	cal/g
สัมประสิทธิ์การขยายตัว (20 °C)	13.8 x 10 <sup>-6</sup>	/°C
ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (20 °C)	6.25-6.36	microhm·cm

#### สมบัติทางกล

	สภาพหล่อหลอม	สภาพอบนึ่ง
ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength)	24 kg/mm <sup>2</sup>	26 kg/mm <sup>2</sup>
พิกัดความยืดหยุ่น (Elastic limit)	22 kg/mm <sup>2</sup>	24 kg/mm <sup>2</sup>
อัตราการยืดตัว (Percent elongation)	4%	8%
ความแข็ง (Hardness)	127 HB.	126 HB.
โมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)	21000 kg/mm <sup>2</sup>	

#### 2.1.4 การชุบเคลือบผิวแบบใช้ไฟฟ้า

ตัวนำไฟฟ้าสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

ประเภทที่ 1 เป็นตัวนำไฟฟ้าโดยตัวเองไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เป็นแค่เพียงสะพานเพื่อให้ไฟฟ้าผ่านได้เท่านั้น เช่น โลหะต่างๆ และแกรไฟต์

ประเภทที่ 2 เป็นตัวนำไฟฟ้าโดยตัวเองแยกสลายออกเป็นอนุภาคเล็กๆ ในขณะที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เช่น น้ำเจือกรด และสารละลายของเกลือต่างๆ เป็นต้น ในทางวิทยาศาสตร์เรียกตัวนำไฟฟ้าประเภทนี้ว่า อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytes) ซึ่งมีส่วนเกี่ยวข้องกับการชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าโดยตรง

เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้แผ่นพลาตินัมเป็นขั้วอิเล็กโทรด อนุภาคเล็กๆพวกหนึ่งของอิเล็กโทรไลต์จะวิ่งไปที่แอโนด (Anode) หรือขั้วบวก ส่วนอนุภาคเล็กๆอีกพวกหนึ่งของอิเล็กโทรไลต์จะวิ่งไปที่แคโทด (Cathode) หรือขั้วลบ อนุภาคเล็กๆดังกล่าวนี้เรียกว่าไอออน (Ions) แต่ละไอออนจะมีประจุไฟฟ้าประจำตัวทุกตัว ไอออนที่วิ่งไปที่ขั้วบวกเรียกว่าแอนไอออน (Anions) มีประจุไฟฟ้าลบ ส่วนไอออนที่วิ่งไปที่ขั้วลบเรียกว่าแคทไอออน (Cations) มีประจุไฟฟ้าบวก ในขณะที่เกิดการแยกสลายดังกล่าวในสารละลาย เราจะมองไม่เห็นปฏิกิริยาใดๆที่เกิดขึ้นเลย แต่จะเห็นปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่ขั้วลบ หรือขั้วบวก ตัวอย่างเช่นในสารละลายอิเล็กโทรไลต์บางชนิด ที่ใช้แผ่นพลาตินัมเป็นขั้วบวกและขั้วลบ เมื่อต่อแผ่นขั้วทั้งสองเข้ากับแบตเตอรี่ให้ครบวงจร จะปรากฏว่ามีฟองแก๊สออกซิเจนเกิดขึ้นที่ขั้วบวก และมีฟองแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้นที่ขั้วลบ เป็นต้น

#### 2.1.4.1 กฎของฟาราเดย์ (Faraday's law)

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยทางแคโทดและแอโนด โลหะจะละลายจากแอโนดหรือมีแก๊สออกซิเจนเกิดขึ้นที่แอโนด และเกิดโลหะเกาะที่แคโทดหรือมีแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้นที่แคโทด ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยมีส่วนสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลาย และระยะเวลาของการปล่อยให้กระแสไฟฟ้าผ่าน ไมเคิล ฟาราเดย์ได้ตั้งกฎความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วทั้งสอง ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ และระยะเวลาที่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไว้ดังนี้

กฎข้อที่ 1 น้ำหนักของไอออนที่ถูกปล่อยให้เป็นอิสระโดยกระแสไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของไฟฟ้าที่ใช้

กฎข้อที่ 2 น้ำหนักของไอออนชนิดต่างๆที่ถูกปล่อยให้เป็นอิสระโดยปริมาณไฟฟ้าเท่าๆกันจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสมมูลเคมีของไอออนเหล่านั้น

จากกฎข้อที่ 1 จึงสามารถนำมาใช้ในการชั่งโลหะได้ คือถ้าต้องการให้โลหะที่มากเกาะมีความหนาจำนวนหนึ่ง อาจจะทำได้ 2 วิธีคือ ใช้กระแสไฟฟ้าน้อยๆ แล้วใช้เวลานานๆ หรือใช้กระแสไฟฟ้ามากๆ แต่ใช้เวลาสั้นๆ ก็จะได้โลหะไปเกาะที่แคโทดมีปริมาณเท่ากัน



จากกฎข้อที่ 2 สามารถทราบได้ว่า โลหะแต่ละชนิดมีคุณสมบัติการแยกสลายไม่เหมือนกัน ซึ่งก็คือปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เท่าๆกัน โลหะแต่ละชนิดจะแยกสลายออกมามีปริมาณไม่เท่ากัน โลหะบางชนิดแยกสลายออกมาน้อย บางชนิดแยกสลายออกมามาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติประจำตัวหรือสมมูลย์ของโลหะนั้นๆ

การคำนวณหาปริมาณโลหะที่ไปเกาะที่แคโทด โดยใช้กฎของฟาราเดย์

$$W = ITA / ZF \quad (\text{สมการที่ 1})$$

W = ปริมาณโลหะที่ไปเกาะที่แคโทด

I = กระแสไฟฟ้า

T = เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิว

A = น้ำหนักอะตอมของโลหะ

Z = จำนวนวาเลนซ์ของโลหะ

F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96485 คูลอมป์)

#### 2.1.4.2 ประสิทธิภาพของขั้วลบ

จากทฤษฎีตามกฎของฟาราเดย์ข้อที่ 1 และจากการทดลองจริงผลปรากฏว่าได้โลหะไปเกาะที่แคโทดน้อยกว่าตามทฤษฎี ซึ่งจากการทดสอบพบว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไปใต้น้ำยาชุบโลหะ ไม่ได้ใช้ไปในการแยกสลายให้โลหะไปเกาะที่แคโทดอย่างเดียว แต่ยังต้องใช้ไปกับการแยกสลายสิ่งอื่นๆ ที่มีอยู่ในน้ำยาอีกด้วย เช่น แก๊สไฮโดรเจน เป็นต้น ดังนั้นถ้านำน้ำหนักของโลหะที่ไปเกาะที่ขั้วลบอย่างแท้จริงมาเปรียบเทียบกับน้ำหนักของโลหะที่ควรจะไปเกาะที่ขั้วลบตามทฤษฎีก็จะสามารถทราบ “ประสิทธิภาพของขั้วลบ” ได้ โดยประสิทธิภาพของขั้วลบของน้ำยาชนิดต่างๆ จะแตกต่างกันออกไป เช่น น้ำยาชุบโครเมียมจะมีประสิทธิภาพขั้วลบต่ำมาก คือประมาณ 10-25% เท่านั้น น้ำยาชุบเงินมีประสิทธิภาพขั้วลบสูงมาก คือเกือบ 100% เป็นต้น

### 2.1.4.3 ค่าของพีเอช (pH Values)

สูตรโมเลกุลของน้ำคือ  $H_2O$  ดังนั้นน้ำ 1 โมเลกุลประกอบด้วยไฮโดรเจน 2 อะตอม และออกซิเจน 1 อะตอม น้ำบริสุทธิ์เมื่อมีการแตกแยกจะได้ไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) และไฮดรอกซิลไอออน ( $OH^-$ ) เล็กน้อยดังสมการ  $H_2O \rightarrow H^+ + OH^-$  ในน้ำบริสุทธิ์ค่าของไฮโดรเจนไอออน และไฮดรอกซิลไอออนจะมีค่าเท่ากัน สภาพเช่นนี้จะมีสภาพเป็นกลาง มีค่า pH = 7 แต่ถ้าในน้ำที่มีไฮโดรเจนไอออนมากกว่าไฮดรอกซิลไอออน น้ำนั้นจะมีสภาพเป็นกรด ค่า pH ตั้งแต่ 7 ลงมาถึง 1 และในทางตรงกันข้ามถ้าในน้ำมีไฮดรอกซิลไอออนมากกว่าไฮโดรเจนไอออน น้ำนั้นก็จะมีสภาพเป็นด่าง pH ตั้งแต่ 7 ถึง 13

ค่าของ pH มีอิทธิพลต่อน้ำยาชุบโลหะมาก ถ้าค่าของ pH น้อย แสดงว่าน้ำยานั้นมีสภาพเป็นกรดมากเกินไป จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของแคโทดลดต่ำลง แต่ถ้าค่าของ pH มาก น้ำยาจะมีสภาพเป็นด่างมากเกินไป จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของแอโนดลดต่ำลงเช่นกัน ดังนั้นการควบคุมค่า pH จึงมีความสำคัญมาก ซึ่งน้ำยาชุบทุกชนิดจะมีค่า pH ที่เหมาะสมอยู่ค่าหนึ่ง ในการใช้งานควรควบคุมค่า pH ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม

ค่า pH มีความสำคัญมากในน้ำยาชุบนิเกิล ถ้ารักษาค่า pH ไม่ถูกต้องจะทำให้เกิดปัญหาต่างๆในการชุบ สำหรับการชุบนิเกิลค่า pH ควรจะรักษาให้อยู่ในช่วง 3.5 ถึง 4.5 ถ้าค่า pH สูงเกินกว่า 4.5 นิเกิลที่ชุบได้จะเปราะ ในขณะที่ค่า pH ต่ำกว่า 3.5 จะมีผลกระทบต่อความเงาและมีแนวโน้มที่จะเกิดรูพรุนขึ้นทำให้ผิวไม่เรียบ การปรับค่า pH ให้ต่ำลงทำได้โดยการเติมกรดกำมะถันเจือจาง และการเพิ่มค่า pH โดยเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์

### 2.1.4.4 ความหนาแน่นของกระแส (Current density)

ความหนาแน่นของกระแสของขั้วลบ คือกระแสที่ช่วยให้เกิดการเคลือบที่ขั้วลบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ปกติมักใช้แอมแปร์ต่อตารางฟุต หรือแอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร การคำนวณหาพื้นที่ของแคโทด เพื่อทราบว่าจะจ่ายความหนาแน่นของกระแสแตกต่างกันออกไปเท่าไร และงานแต่ละชิ้นก็มีเนื้อที่แตกต่างกัน ดังนั้นเหตุนี้กระแสและเนื้อที่จึงต้องพิจารณาเป็นอันดับแรก

#### 2.1.4.5 การชุบเคลือบผิวแบบใช้ไฟฟ้า ด้วยนิกเกิลสไตรค์

นิกเกิลสไตรค์ใช้ชุบบนชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม ก่อนทำการชุบต้องเอาออกไซด์ออก จากผิวก่อน และเป็นการกระตุ้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม นิกเกิลสไตรค์จะได้ผิวชุบบางๆ และนำไปชุบ ในขั้นต่อนต่อไป ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ [9]

##### 1. ชนิดคลอไรด์ ประกอบด้วยนิกเกิลคลอไรด์ และกรดเกลือ

สูตร	นิกเกิลคลอไรด์ ( $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )	240 กรัม/ลิตร
	กรดเกลือเข้มข้น ถ.พ. 1.18 (HCl)	86 มิลลิลิตร/ลิตร
	กระแสไฟฟ้า	3 แอมป์/ตารางเดซิเมตร
	อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง
เวลาชุบ	2-3 นาที	ใช้งานเป็นขั้วบวก
	6 นาที	ใช้งานเป็นขั้วลบ

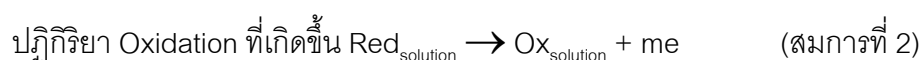
การชุบนิกเกิลสไตรค์ ต้องล้างชิ้นงานให้สะอาด แล้วกัดผิวในกรดกำมะถัน 30% โดยน้ำหนัก โดยใช้งานเป็นขั้วบวก เวลา 3 นาที ไฟฟ้า 6 โวลท์ เมื่อครบ 3 เมื่อครบ 3 นาทีแล้วปิด ไฟฟ้าประมาณ 15 วินาที แล้วจึงชุบโดยใช้งานเป็นขั้วลบ ประมาณ 6 นาที

##### 2. ชนิดซัลเฟต ประกอบด้วยนิกเกิลซัลเฟต และกรดกำมะถัน

สูตร	นิกเกิลซัลเฟต ( $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )	250 กรัม/ลิตร
	กรดกำมะถัน ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )	25 มิลลิลิตร/ลิตร
	กระแสไฟฟ้า	16-22 แอมป์/ตารางเดซิเมตร
	อุณหภูมิ	35-40 องศาเซลเซียส
เวลาชุบ		5-10 นาที

## 2.1.5 การชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

การชุบเคลือบผิวโลหะโดยทั่วไปแล้วจะต้องชุบโดยกรรมวิธีทางไฟฟ้ากระแสตรง จะต้องมีส่วนล่อเป็นขั้วบวก (Anode) และขั้วงานที่ชุบเป็นขั้วลบ (Cathode) แต่กระบวนการชุบด้วยวิธีนี้ไม่ต้องใช้กระแสไฟฟ้า แต่ใช้ปฏิกิริยา Reduction ในตัวของสารละลาย ภายใต้สภาวะปฏิกิริยาที่เหมาะสม โดยใช้สาร Reducing agent (Red) เป็นตัวแยกธาตุโลหะออกจากน้ำยาชุบมาเกาะที่ขั้วงานซึ่งผลของการชุบจะได้ผิวเคลือบที่มีความแข็งและสม่ำเสมอ [9]



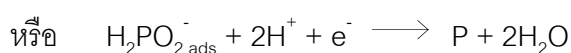
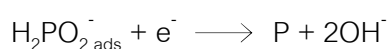
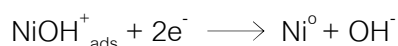
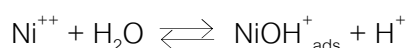
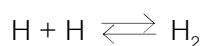
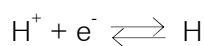
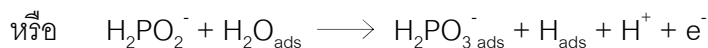
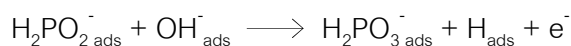
เมื่อจุ่มวัสดุพื้นลงไปในการละลายที่มี  $\text{M}^{z+}$  และ reducing agent ปฏิกิริยาดังสมการ 2 และ 3 จะเกิดขึ้นพร้อมๆกัน ซึ่งทั้งสองปฏิกิริยาจะพยายามปรับตัวเข้าสู่สมดุล (Equilibrium) โดยที่ศักย์ไฟฟ้าที่จุดสมดุลของสมการที่ 2 จะต้องน้อยกว่าของสมการที่ 3 จึงจะทำให้ reducing agent สามารถให้อิเล็กตรอนได้ เมื่อกระบวนการชุบเคลือบผิวเข้าสู่สภาวะ steady state เรียกว่า steady-state mixed potential จะทำให้ศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยา oxidation เพิ่มสูงขึ้น และศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยา reduction จะลดลง จนมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน เรียกว่า mixed potential และเป็นบริเวณที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากันค่าหนึ่ง ซึ่งมีอัตราการ reduction ของ  $\text{M}^{z+}$  และอัตราการ oxidation ของ reducing agent เท่ากัน โดยสามารถนำค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้านี้ไปใช้กับสมการที่ 1 เพื่อคำนวณหาปริมาณโลหะที่ไปเกาะบนวัสดุพื้นได้

### 2.1.5.1 การชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้า ด้วยนิกเกิล-ฟอสฟอรัส

การชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้านิกเกิล-ฟอสฟอรัสถูกคิดค้นโดย Brenner และ Riddell ขึ้นเคลือบที่ได้จะมีความสม่ำเสมอ มีความแข็ง ความต้านทานการสึกหรอ และความต้านทานการกัดกร่อนที่สูง จึงทำให้ผิวเคลือบนิกเกิล-ฟอสฟอรัสมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ เคมี น้ำมัน แก๊ส และอิเล็กทรอนิกส์

ปัจจุบันนี้ในทางการค้ามีการใช้งานชั้นเคลือบนิเกิล-ฟอสฟอรัสที่มีปริมาณฟอสฟอรัสอยู่ระหว่าง 2-14 wt% โดยสามารถแบ่งออกได้ 3 กลุ่มคือ 1.ฟอสฟอรัสน้อย (2-4 wt%) ชั้นเคลือบจะมีโครงสร้าง nanocrystalline และอาจจะมีโครงสร้างอสัณฐาน (amorphous) เกิดขึ้นได้ 2. ฟอสฟอรัสกลาง (5-9 wt%) มีโครงสร้างเป็น nanocrystalline และ amorphous 3.ฟอสฟอรัสมาก ( $\geq 10$  wt%) มีโครงสร้าง amorphous ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณฟอสฟอรัสมีผลต่อโครงสร้างจุลภาค ซึ่งทำให้ชั้นเคลือบที่ได้มีสมบัติที่แตกต่างกัน โดยที่ชั้นเคลือบ as-deposited ที่มีปริมาณฟอสฟอรัสน้อยจะมีความแข็งที่สูง และต้านทานต่อการสึกหรอได้ดี ส่วนชั้นเคลือบที่มีฟอสฟอรัสมากจะมีสมบัติด้านการต้านทานการกัดกร่อนที่ดี ซึ่งอัตราการเคลือบ สมบัติชั้นเคลือบ และโครงสร้างของชั้นเคลือบที่ได้นั้นจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมของสารละลาย ค่าพีเอช และอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบ

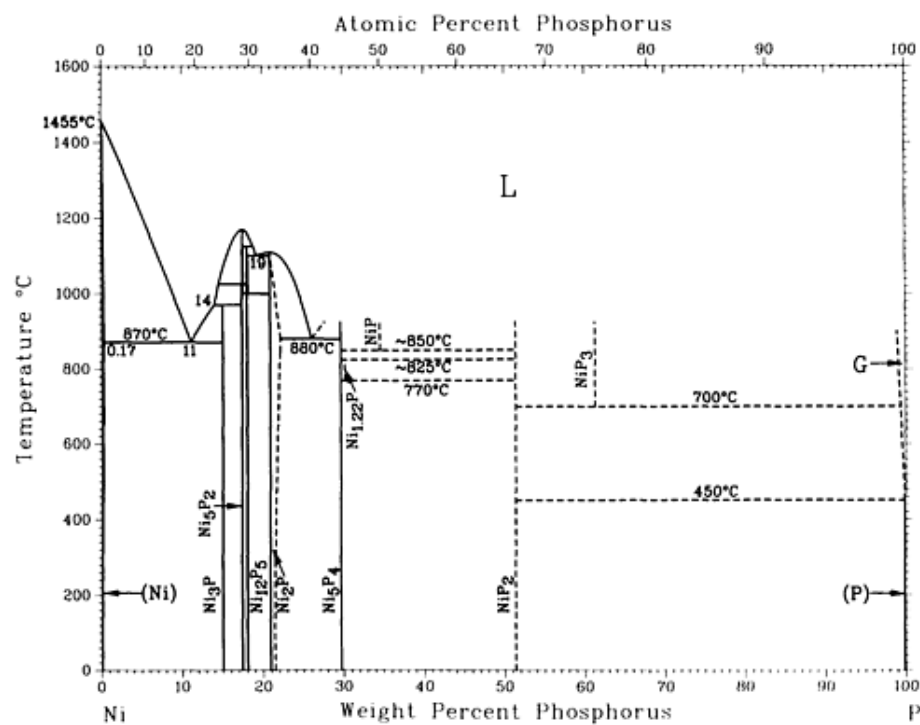
โดยมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสารละลายเป็นดังนี้ [10]



โดยทั่วไปแล้วสมบัติของชั้นเคลือบนิเกิล-ฟอสฟอรัสสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ด้วยการวิธีทางความร้อน ซึ่งการอบอ่อนที่อุณหภูมิประมาณ  $400^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมงจะทำให้ได้ความแข็งสูงที่สุด [1,2] เนื่องจากเกิดนิเกิลที่มีเกรนละเอียด และสารประกอบเชิงโลหะชนิด  $\text{Ni}_3\text{P}$  ซึ่งมีความแข็งสูงและเป็นเฟสที่ stable ส่วนการอบชุบต่ำกว่า  $400^\circ\text{C}$  จะเกิดการตกผลึกของเฟส metastable ได้ เช่น  $\text{Ni}_{12}\text{P}_5$  และ  $\text{Ni}_2\text{P}$  [11] การเติมธาตุที่สามลงไปชั้นเคลือบนิเกิล-ฟอสฟอรัส เช่น โคบอลต์ เหล็ก และสังกะสี ก็สามารถช่วยเพิ่มความแข็งให้สูงขึ้นได้ [3,4,5] นอกจากนี้การ

ใส่ผงเพชรหรือผงเซรามิก เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ เข้าไปในชั้นเคลือบนิเกิล-ฟอสฟอรัสก็ช่วยเพิ่มความแข็ง ความต้านทานการสึกหรอให้สูงขึ้น และ/หรือทำให้ผิวเคลือบมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวลดลงได้ [2,12,13]

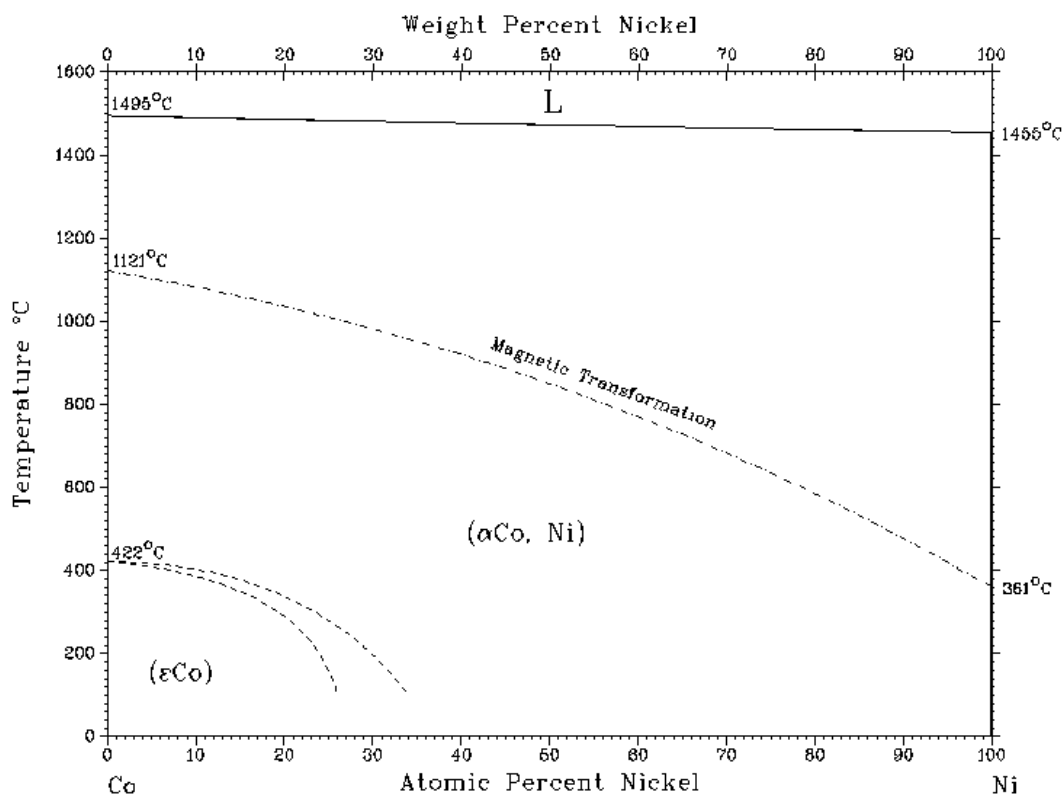
### 2.1.6 แผนภูมิสมมูลเฟสของนิเกิล-ฟอสฟอรัส



ภาพที่ 2.1 แผนภูมิสมมูลเฟสของนิเกิล-ฟอสฟอรัส

จากภาพที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของนิเกิลในแต่ละส่วนผสมของฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งฟอสฟอรัสสามารถละลายในนิเกิลในสภาพสารละลายของแข็งได้ และเกิดสารประกอบเชิงโลหะชนิด  $Ni_3P$  เมื่อมีปริมาณฟอสฟอรัส 15 wt% ถ้ามีฟอสฟอรัสละลายอยู่มากขึ้นก็จะเกิดสารประกอบเชิงโลหะชนิดอื่น เช่น  $Ni_5P_2$ ,  $Ni_{12}P_5$ ,  $Ni_2P$  และ  $Ni_5P_4$  เป็นต้น

## 2.1.7 แผนภูมิสมดุลเฟสของโคบอลต์-นิกเกิล



ภาพที่ 2.2 แผนภูมิสมดุลเฟสของโคบอลต์-นิกเกิล

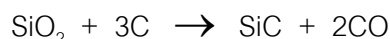
จากแผนภูมิแสดงให้เห็นว่าโคบอลต์มีความสามารถในการละลายได้ในนิกเกิลทุกส่วนผสม และทุกอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังพบว่าไม่เกิดสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโคบอลต์-นิกเกิล

## 2.1.8 หินเจีย (Grinding wheels)

2.1.8.1 ผงขัด (Abrasives) ที่นำมาใช้งานในการผลิตหินเจีย สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยแบ่งตามความแข็ง และราคาของผงขัด คือ 1. Conventional abrasives ได้แก่ ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 2. Superabrasives ได้แก่ ผงเพชร และ Cubic boron nitride (CBN) กลุ่มนี้ผงขัดจะมีความแข็ง และราคาที่สูงกว่าประมาณ 10-100 เท่า

## 1. Conventional abrasives

1.1 ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) มีการผลิตครั้งแรกในปีค.ศ.1891 โดย Dr.E.G.Acheson โดยการผลิตเกิดจากการทำปฏิกิริยาของทรายซิลิกา (Silica sand) และถ่านโค้ก (Coke) ที่อุณหภูมิประมาณ 2,400°C ดังสมการนี้



ความแข็งวัดจากเครื่อง Knoop มีค่าประมาณ 2,500-2,800 kg/mm<sup>2</sup> ซึ่งมีความเปราะกว่าอะลูมินา นอกจากนี้ที่อุณหภูมิมากกว่า 750 °C ซิลิกอนคาร์ไบด์จะทำปฏิกิริยากับโลหะที่มีความดึงดูดกับคาร์บอน เช่น เหล็ก และนิกเกิล ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งาน คือเหมาะกับการใช้งานกับโลหะนอกกลุ่มเหล็ก

1.2 อะลูมินา (Alox) มีการผลิตจากวิธี Electrofusion และ Chemical precipitation and/or sintering ซึ่งอะลูมินาแบ่งออกได้หลายเกรดขึ้นอยู่กับออกไซด์ที่อยู่ในสารละลายของแข็ง (Solid solution) เช่น โครเมียมออกไซด์ ไทเทเนียมออกไซด์ เซอร์โคเนียมออกไซด์ และวาเนเดียมออกไซด์ โดยที่ใส่เข้าไปเพื่อปรับปรุงสมบัติของอะลูมินา

1.2.1 วิธี Electrofusion ใช้วัตถุดิบเป็นแร่ bauxite ผลิตอะลูมินาชนิดต่างๆ ได้แก่

Brown alumina จะมี TiO<sub>2</sub> ผสมอยู่ประมาณ 3% ความแข็งวัดจากเครื่อง Knoop มีค่าประมาณ 2,090 kg/mm<sup>2</sup> ถ้ามี TiO<sub>2</sub> มากขึ้นจะส่งผลทำให้มีความแกร่งมากขึ้น แต่ค่าความแข็งจะลดลง

White alumina เป็นอะลูมินาที่มีความบริสุทธิ์มากกว่า 90% และเป็นชนิดที่มีความแข็งมาก แต่ก็มีค่าความเปราะเหมือนกัน

Pink alumina ผลิตโดยใช้ White alumina ผสมกับโครเมียมออกไซด์ <5% ทำให้มีสีชมพู อะลูมินาชนิดนี้จะมีความแข็งกว่า White alumina เล็กน้อย

Ruby alumina มีโครเมียมออกไซด์ผสมอยู่ 3% จะมีความเปราะมากกว่า Pink alumina



Zirconia-alumina การผสม zirconia ลงไปเพื่อทำให้ขนาดเกรนของอะลูมินาเล็กลง และเพิ่มความแกร่ง ในการใช้งานกับหินเจียรมีใช้อยู่ 3 เกรด ซึ่งแตกต่างกันตามส่วนผสม ได้แก่ 75%Alox - 25%ZrO<sub>2</sub>, 60%Alox - 40% ZrO<sub>2</sub> และ 65%Alox - 30% ZrO<sub>2</sub> - 5%TiO<sub>2</sub>

1.2.2 วิธี Chemical precipitation and/or sintering ถูกพัฒนาขึ้นมาเนื่องจากข้อจำกัดในการผลิตของวิธี Electrofusion ซึ่งได้ผงอะลูมินาที่มีขนาดใหญ่ โดยในหนึ่งเกรนจะมี 1-3 ผลึก ดังนั้นเมื่อใช้งานแล้วเกรนเกิดการแตกหักจะทำให้เกิดการสูญเสียผงขนาดเล็กๆที่หลุดออกไปเป็นสัดส่วนที่มากเมื่อเทียบกับขนาดของเกรน จึงส่งผลให้ผงขัดมีประสิทธิภาพลดลง ซึ่งแก้ปัญหาได้โดยการลดขนาดของผลึกให้เล็กลง อะลูมินาที่ผลิตด้วยวิธีนี้ ได้แก่

Seeded gel abrasive (SG) มีความแข็งประมาณ 21 GPa

Sol gel abrasive หรือเรียกว่า Cubitron มีความแข็งประมาณ 19 GPa

Extruded SG abrasive มี 2 เกรด คือ TG และ TG2 มีอัตราส่วนของความยาวต่อความสูงเป็น 4:1 และ 8:1 ตามลำดับ

## 2. Superabrasives

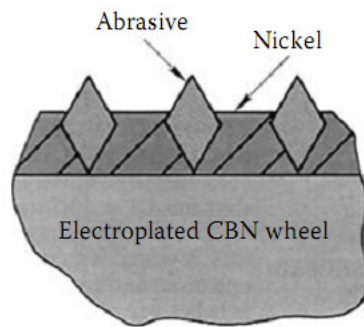
2.1 Diamond abrasive เพชรสามารถผลิตได้จากกราไฟต์โดยตรง โดยต้องใช้อุณหภูมิ 2,500 K และความดันมากกว่า 100 Kbar เป็นผงขัดที่มีความแข็งมากที่สุด

2.2 CBN เป็นผงขัดที่มีความแข็งรองลงมาจากผงเพชร ความแข็งวัดด้วยเครื่อง Knoop มีความแข็งประมาณ 4,500 kg/mm<sup>2</sup> ซึ่งแข็งประมาณครึ่งหนึ่งของผงเพชร และแข็งเป็นสองเท่าของ Conventional abrasives

2.1.8.2 Bond สามารถแบ่งออกหลักๆได้ 2 แบบ คือ แบบแรกมีวัสดุพื้นอยู่ตรงกลาง โดยมี bond ยึดผงขัดอยู่ในลักษณะ single layer อยู่บนวัสดุพื้น แบบที่สองเป็น bond ที่ยึดชั้นของผงขัดจำนวนมากไว้ภายใน bond ได้แก่ Vitrified bond, Resin bond, และ Metal bond

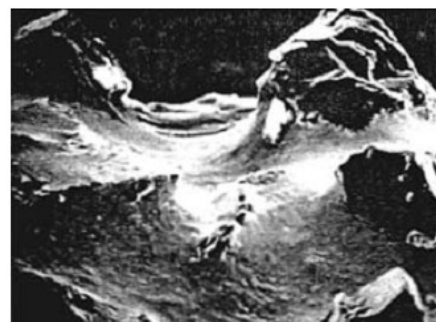
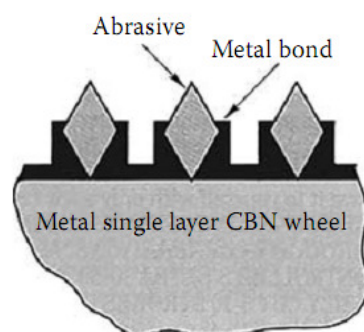
1. Single layer wheels โดยทั่วไปแล้วจะใช้งานกับ Superabrasives เพราะจะเพิ่มอายุการใช้งานของหินเจียรให้ยาวนานขึ้น ซึ่งวิธีการผลิตแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ Electroplated wheels จะผลิตที่อุณหภูมิต่ำ และ Brazed wheels จะผลิตที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,000°C

1.1 Electroplated เป็นวิธีที่ใช้อุณหภูมิต่ำกว่า  $100^{\circ}\text{C}$  และมีผงขัดแบบ Superabrasives อยู่เป็น single layer โดยใช้นิกเกิลเคลือบบนวัสดุพื้นด้วยวิธีการชุบเคลือบผิวแบบใช้ไฟฟ้า (Electrodeposition) หรือวิธีการชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless)



ภาพที่ 2.3 การชุบเคลือบผิวแบบ Electroplating

1.2 Brazed เนื่องจากกระบวนการ Electroplating การยึดติดของชั้นเคลือบและผงขัดที่มีประสิทธิภาพ ชั้นที่เคลือบต้องมีความหนามากกว่าครึ่งหนึ่งของความสูงผงขัด ส่วนวิธีนี้ใช้ Chemical bonding โดยใช้โลหะผสม เช่น นิกเกิล/โครเมียม ซึ่งมีความหนาของชั้นเคลือบที่ใช้ยึดผงขัดน้อย ทำให้ใช้งานผงขัดได้อย่างคุ้มค่ากว่า แต่เนื่องจากวิธีนี้กระทำที่อุณหภูมิสูงจึงอาจส่งผลต่อความแกร่งของผงขัด และการบิดเบี้ยวของวัสดุพื้น



ภาพที่ 2.4 การเคลือบผิวแบบ Brazed

2. Vitriified bond wheels มีการผลิตโดยใช้งานกับผงขัดทั้ง conventional abrasives และ Superabrasives

3. Resin bond wheels สามารถแบ่งออกตามความแข็งแรง และความต้านทานต่ออุณหภูมิเป็น 3 กลุ่ม คือ Plastic bonds, Phenolic resin bonds และ Polyimide resin bonds

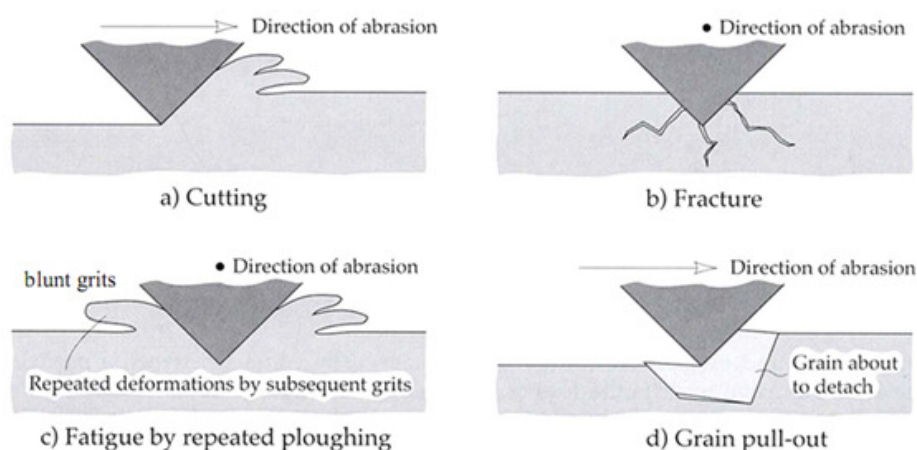
4. Metal bonds เป็น bond ที่มีความแกร่งมากที่สุด และเกือบทั้งหมดจะใช้งานกับ Superabrasives

5. Other bond systems มีการใช้งานกับ conventional abrasives ได้แก่ Rubber, Shellac และ Silicate bond [14]

## 2.1.9 พฤติกรรมการสึกหรอของวัสดุ

### 2.1.9.1 การสึกหรอแบบ Abrasive wear

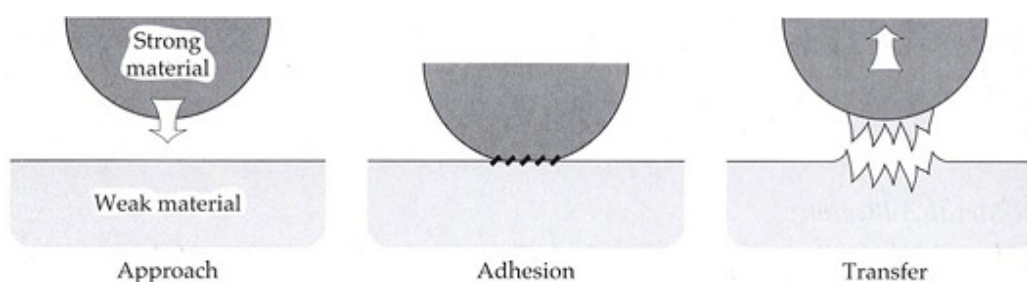
การสึกหรอประเภทนี้เกิดจากการเสียดสีกันของวัสดุที่มีความแข็งต่างกัน ทำให้วัสดุที่มีความแข็งน้อยกว่าเกิดการสึกหรอและสูญเสียเนื้อของวัสดุไป ซึ่งสามารถแบ่งกลไกการเกิดออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้ คือ Cutting, Fracture, Fatigue และ Grain pull out



ภาพที่ 2.5 การสึกหรอแบบ abrasive wear ในแบบต่างๆ

### 2.1.9.2 การสึกหรอแบบ Adhesive wear

การสึกหรอประเภทนี้จะมีอัตราการสึกหรอที่สูงเมื่อเทียบกับการสึกหรอประเภทอื่น และมีสัมประสิทธิ์ความเสียหายไม่คงที่ เนื่องจากเกิดการติดกันของเนื้อวัสดุทำให้ความเสียหายสูงขึ้น และเกิดการหลุดของเศษการสึกหรอ (wear debris) ทำให้ความเสียหายต่ำลง โดยการสึกหรอประเภทนี้จะมีความรุนแรงเมื่อเกิดการสัมผัสกันระหว่างวัสดุที่เป็นโลหะกับโลหะ

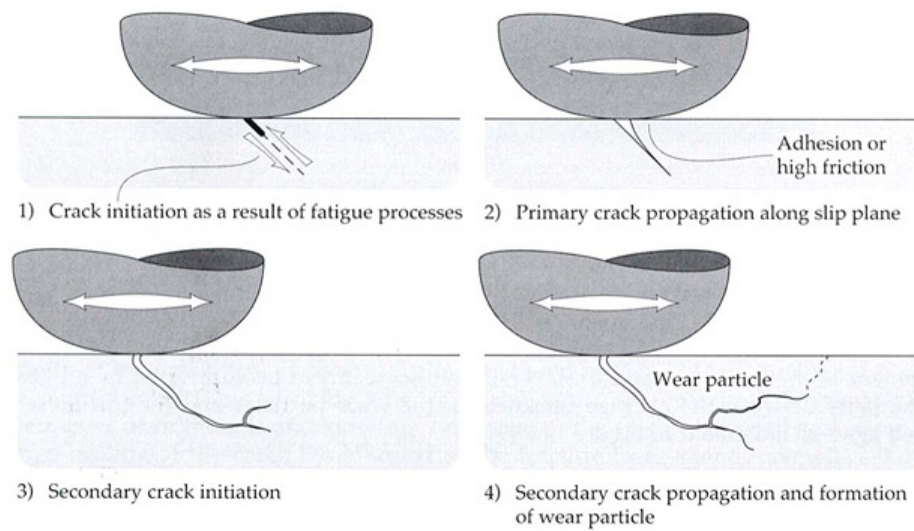


ภาพที่ 2.6 การสึกหรอแบบ adhesive wear ของวัสดุโลหะกับโลหะ

อย่างไรก็ตามความรุนแรงของการสึกหรอประเภทนี้จะลดลง เมื่อมีสิ่งเจือปนระหว่างผิวสัมผัส เช่น ออกซิเจน น้ำ หรือสารหล่อลื่น เนื่องจากไม่เกิดการสัมผัสกันโดยตรงของผิววัสดุ นอกจากนี้ความหยาบผิวที่สูงขึ้นยังพบว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้การสึกหรอประเภทนี้มีความรุนแรงที่ลดลง

### 2.1.9.3 การสึกหรอแบบ Fatigue wear

การสึกหรอประเภทนี้เกิดจากการสัมผัสกันของผิววัสดุซ้ำไปมาเป็นเวลานานในระหว่างการ sliding และ rolling โดยมีหรือไม่มีสารหล่อลื่นก็ตาม วัสดุที่เกิดการสึกหรอแบบนี้จะเกิดการเสียรูปถาวร (Plastic deformation) ที่ผิวสูง ทำให้ผิวมีความเค้นตกค้างสูงอันเป็นสาเหตุให้เกิดรอยแตกขึ้น หลังจากนั้นรอยแตกจะโตต่อไปเรื่อยๆ และทำให้เกิดการสึกหรอลักษณะเป็นแผ่นหลุดออกมาในท้ายที่สุด โดยมีลักษณะแตกต่างจากการสึกหรอประเภทอื่นตรงที่จะเกิดความเครียดที่ผิวสูงกว่าบริเวณภายในของเนื้อวัสดุ

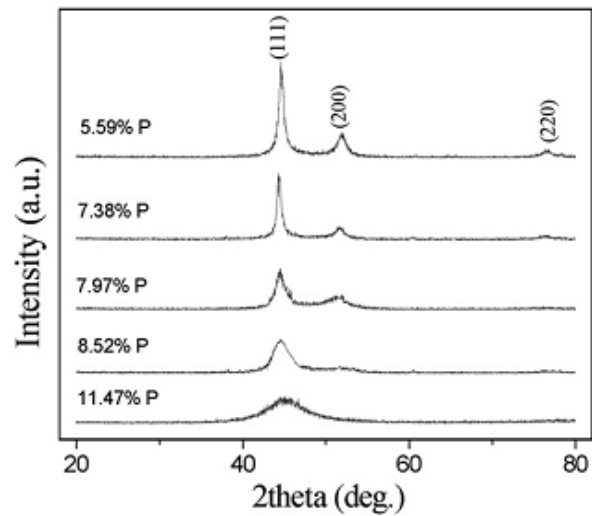


ภาพที่ 2.7 กลไกการเกิดสึกหรอบแบบ fatigue wear

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

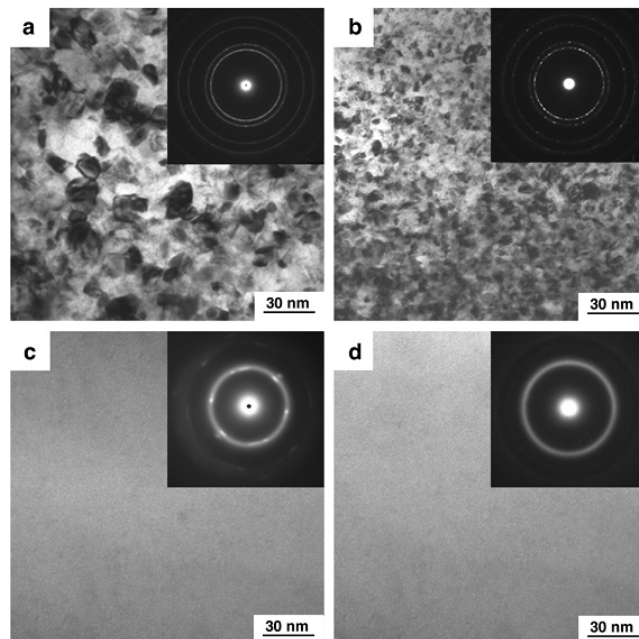
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องนี้เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวกับการปรับปรุงความแข็ง และความต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบที่ผ่านการชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้า เพื่อที่จะนำกระบวนการไปประยุกต์ใช้ในการผลิตหินเจียร

ปี ค.ศ.2008 M. Yan, H.G. Ying และ T.Y. Ma ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงความแข็ง และความต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบ as-deposited ที่ชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้าด้วย นิกเกิล-ฟอสฟอรัส



ภาพที่ 2.8 XRD patterns ของชั้นเคลือบที่ชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าด้วยนิกเกิล-ฟอสฟอรัส ที่มีปริมาณฟอสฟอรัสแตกต่างกัน

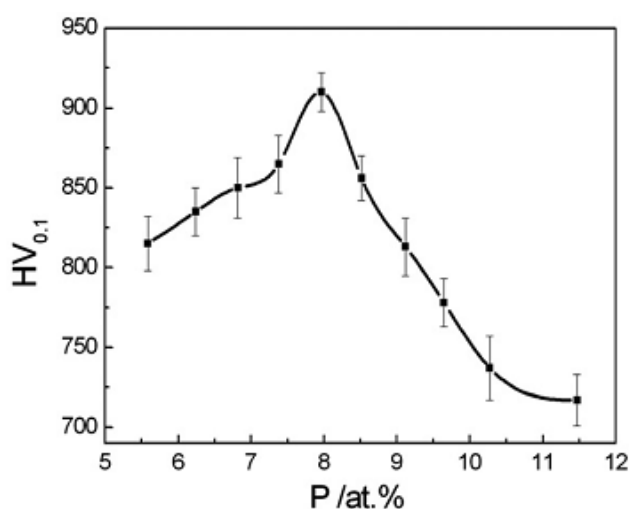
จากภาพแสดงให้เห็นว่า 11.47at%P มีโครงสร้าง amorphous และเมื่อมีปริมาณฟอสฟอรัสน้อยลงโครงสร้างจะเปลี่ยนเป็น crystalline นอกจากนี้ครึ่งหนึ่งของความกว้างของ diffraction peaks ลดลงเมื่อปริมาณฟอสฟอรัสลดลง แสดงให้เห็นว่าเกรนมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น



ภาพที่ 2.9 ภาพถ่ายจาก TEM และ Selected Area Electron Diffraction (SAED) ของชั้นเคลือบ as-deposited นิกเกิล-ฟอสฟอรัส (a) 5.59 at% (b) 7.97 at% (c) 8.52 at% (d) 11.47 at%

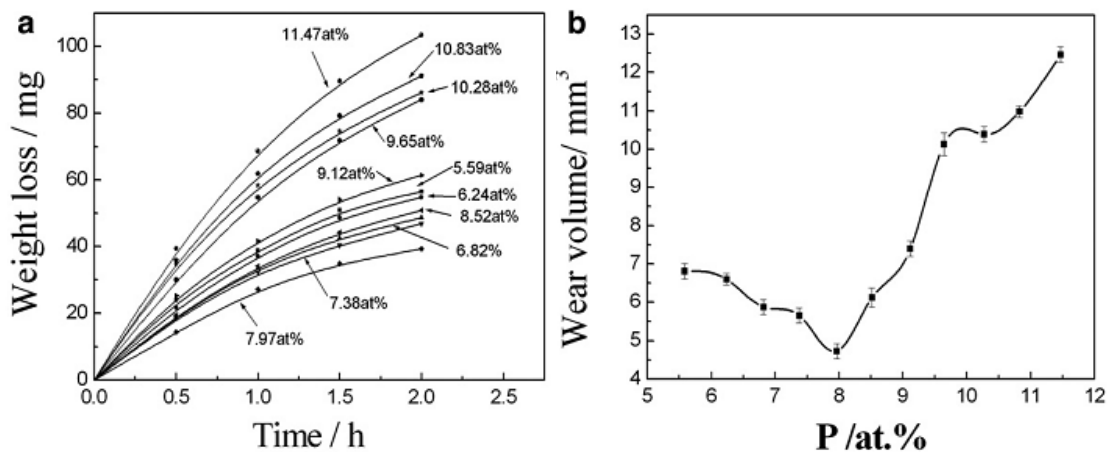
จากภาพที่ 2.9 แสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบที่มีปริมาณฟอสฟอรัส 5.59 at% และ 7.97 at% มีโครงสร้างเป็น crystalline และมีขนาดเกรนที่เล็กลงเมื่อมีปริมาณฟอสฟอรัสเพิ่มมากขึ้นจาก 5.59 at% จนถึง 7.97 at% จากผลของ XRD ที่ 7.97 at% ชั้นเคลือบมีขนาดเกรนประมาณ 4 นาโนเมตร ส่วนภาพ (c) และ (d) จะมองไม่เห็นเกรน ซึ่งจาก SAED patterns สามารถบอกได้ว่าเป็น 11.47 at% มีโครงสร้างเป็น amorphous และชั้นเคลือบ 8.52 at% มีโครงสร้างเป็น amorphous และ nanocrystalline ผสมกัน

จาก XRD patterns และ TEM สามารถสรุปได้ว่าชั้นเคลือบนิกเกิล-ฟอสฟอรัส ที่ชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้ามีโครงสร้างเป็น nanocrystalline เมื่อมีปริมาณฟอสฟอรัสในชั้นเคลือบน้อยๆ และขนาดของเกรนจะละเอียดขึ้นเมื่อมีปริมาณฟอสฟอรัสมากขึ้น ซึ่งอาจจะได้โครงสร้างที่เป็น amorphous และ nanocrystalline หรือได้โครงสร้างเป็น amorphous เพียงอย่างเดียวได้ ถ้ามีฟอสฟอรัสปริมาณมากเพียงพอ



ภาพที่ 2.10 ผลของปริมาณฟอสฟอรัสที่แตกต่างกันต่อค่าความแข็งของชั้นเคลือบ as-deposited นิกเกิล-ฟอสฟอรัส

จากภาพแสดงให้เห็นว่าปริมาณฟอสฟอรัสมีผลต่อค่าความแข็งของชั้นเคลือบ โดยที่ความแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณฟอสฟอรัสเพิ่มมากขึ้นจนถึง 7.97at% เมื่อมีฟอสฟอรัสมากขึ้นกว่า 7.97at% ค่าความแข็งกลับลดลง ความแข็งสูงสุด 910 HV ที่ 7.97 at%P

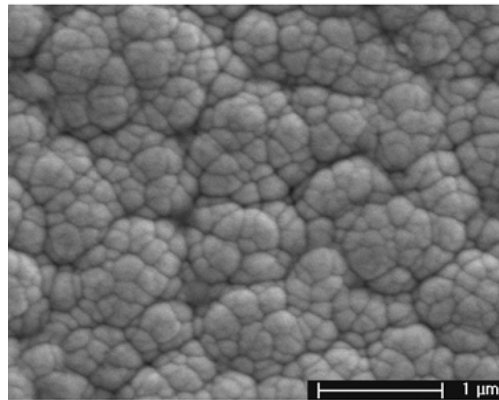


ภาพที่ 2.11 ความต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบที่มีปริมาณฟอสฟอรัสแตกต่างกัน ภาพ (a) ปริมาณ weight loss เมื่อใช้เวลาในการทดสอบการสึกหรอมากขึ้น (b) ปริมาณ wear volume

ภาพ (a) แสดงน้ำหนักที่สูญเสียไปเทียบกับเวลาในการทดสอบการสึกหรอ จะเห็นได้ว่าการสึกหรอในช่วงแรกมีการสูญเสียเนื้อวัสดุไปมาก และเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นก็จะสูญเสียเนื้อวัสดุมากขึ้นเล็กน้อย ภาพ (b) ปริมาตรที่สูญเสียไปของชั้นเคลือบที่มีฟอสฟอรัสต่างๆ มีลักษณะคล้ายกับรูปที่แสดงค่าความแข็ง คือเมื่อมีฟอสฟอรัสมากขึ้นเรื่อยๆถึง 7.97at% จะมีปริมาตรที่สูญเสียไปน้อยลง และเมื่อมีฟอสฟอรัสมากกว่า 7.97at% ก็จะมีปริมาตรที่สูญเสียไปเพิ่มขึ้นจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบ 7.97at%P มีความต้านทานการสึกหรอที่ดีที่สุด

เนื่องจากว่าเมื่อมีปริมาณฟอสฟอรัสมากขึ้นโครงสร้างของชั้นเคลือบจะเปลี่ยนแปลงจาก crystalline ไปเป็น nanocrystalline เมื่อฟอสฟอรัสสูงขึ้นไปอีกจะมีโครงสร้างผสมกันระหว่าง nanocrystalline และ amorphous ในที่สุดจะมีโครงสร้างเป็น amorphous ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อฟอสฟอรัสมากขึ้นเกรนจะมีขนาดที่เล็กลงเรื่อยๆ ดังนั้นชั้นเคลือบที่มีฟอสฟอรัสน้อยกว่า 7.97at%P ความแข็งแรงจะเกิดจากการลดขนาดของเกรนให้เล็กลง โดยความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นเมื่อฟอสฟอรัสมากขึ้น แต่เมื่อชั้นเคลือบที่มีฟอสฟอรัสมากกว่า 7.97at%P จะเริ่มเกิดเฟส amorphous ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่า nanocrystalline เมื่อมีฟอสฟอรัสมากขึ้นก็จะมีเฟส amorphous มากขึ้น ค่าความแข็งของชั้นเคลือบก็จะยิ่งลดลง ซึ่งความแข็งเป็นค่าหนึ่งที่มีผลต่อความต้านทานการสึกหรอของวัสดุ ดังนั้นค่าความแข็งที่สูงจะทำให้วัสดุมีความต้านทานการสึกหรอที่ดีด้วย [15]

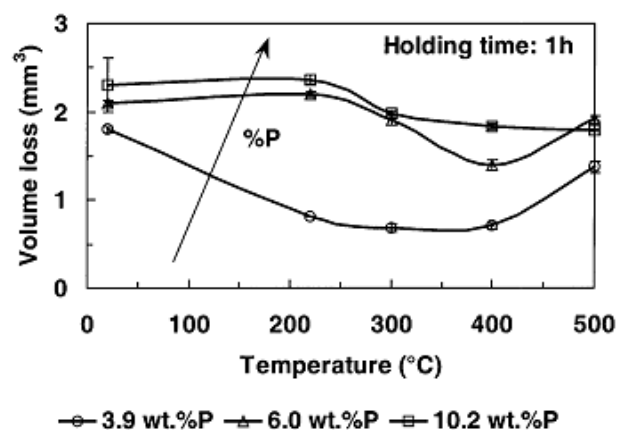




ภาพที่ 2.12 ลักษณะโครงสร้างของชั้นเคลือบ as-deposited นิกเกิล-ฟอสฟอรัส ที่มีปริมาณฟอสฟอรัส 7.97at% (4.37 wt%)

ปี ค.ศ.2002 I. Apachitei, F.D. Tichelaar, J. Duszczyk และ L. Katgerman ได้ทำการทดลองศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง และความต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบที่ชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้าด้วยนิกเกิล-ฟอสฟอรัส เมื่อผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

โดยทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้าง และความต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบที่ชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าด้วยนิกเกิล-ฟอสฟอรัส โดยใช้ปริมาณฟอสฟอรัสที่แตกต่างกันคือ 3.9 wt% (ฟอสฟอรัสน้อย) 6.0 wt% (ฟอสฟอรัสปานกลาง) และ 10.2 wt% (ฟอสฟอรัสมาก) และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกันคือ 220°C 300°C 400°C และ 500°C



ภาพที่ 2.13 ปริมาตรที่สูญเสียไปหลังจากทดสอบการสึกหรอของชั้นเคลือบนิกเกิล-ฟอสฟอรัส ที่มีปริมาณฟอสฟอรัส และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

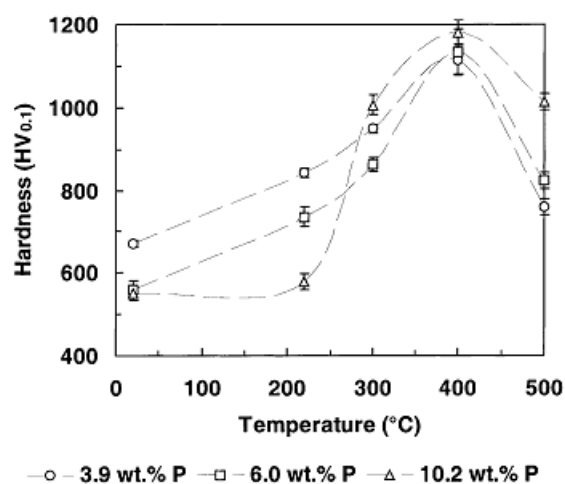
จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณของฟอสฟอรัส และอุณหภูมิของกรรมวิธีทางความร้อนเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อความต้านทานการสึกหรอ ซึ่งชั้นเคลือบที่มีฟอสฟอรัสผสมอยู่น้อยมีปริมาตรที่เสียไปน้อยกว่าชั้นเคลือบที่มีฟอสฟอรัสปานกลาง และฟอสฟอรัสมาก

ชั้นเคลือบฟอสฟอรัสน้อยที่ผ่านการอบชุบทางความร้อน แสดงให้เห็นว่ามีความต้านทานการสึกหรอที่สูงมากขึ้นหลังจากอบอ่อนที่  $220^{\circ}\text{C}$  และต้านทานการสึกหรอมากขึ้นกว่าเดิมเล็กน้อยเมื่ออบอ่อนถึง  $400^{\circ}\text{C}$  แต่เมื่อใช้อุณหภูมิสูงขึ้นความต้านทานการสึกหรอจะลดลง

ชั้นเคลือบฟอสฟอรัสปานกลางต้านทานการสึกหรอเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่ออบอ่อนถึงอุณหภูมิ  $300^{\circ}\text{C}$  และต้านทานการสึกหรอดีที่สุดที่  $400^{\circ}\text{C}$  เมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากขึ้นก็จะมีความต้านทานการสึกหรอที่ลดลงเหมือนกับชั้นเคลือบฟอสฟอรัสน้อย

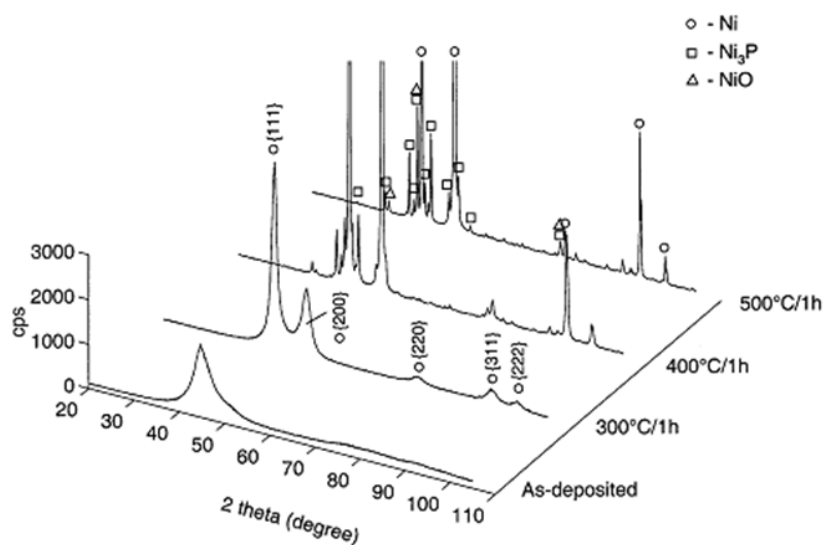
ชั้นเคลือบที่มีฟอสฟอรัสสูงความต้านทานการสึกหรอไม่เปลี่ยนแปลงเมื่ออบอ่อนถึงอุณหภูมิ  $220^{\circ}\text{C}$  ความต้านทานการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นเมื่ออบอ่อนถึงอุณหภูมิ  $300^{\circ}\text{C}$  และยังคงเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อยเมื่ออบอ่อนถึงอุณหภูมิ  $500^{\circ}\text{C}$

การที่ชั้นเคลือบฟอสฟอรัสน้อยมีความต้านทานการสึกหรอที่ดี เนื่องจากมีโครงสร้างเป็น nanocrystalline ซึ่งจะมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าชั้นเคลือบที่มีโครงสร้างเป็น amorphous



ภาพที่ 2.14 ความแข็งของชั้นเคลือบนิเกิล-ฟอสฟอรัส ที่มีปริมาณฟอสฟอรัส และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

ค่าความแข็งมีแนวโน้มที่เหมือนกับค่าความต้านทานการสึกหรอคือ ค่าความแข็งของชั้นเคลือบฟอสฟอรัสน้อย และฟอสฟอรัสปานกลางมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงอุณหภูมิ 400°C ขณะที่ชั้นเคลือบฟอสฟอรัสสูงค่าความแข็งเริ่มเพิ่มสูงขึ้นหลังจากอบอ่อนที่ 300°C และชั้นเคลือบทุกส่วนผสมมีค่าความแข็งสูงที่สุดเมื่ออบอ่อนที่ 400°C หลังจากนั้นจะมีความแข็งลดลง แต่ชั้นเคลือบฟอสฟอรัสสูงมีความแข็งที่สูงกว่าชั้นเคลือบอื่นๆ ที่ 500°C



ภาพที่ 2.15 XRD pattern ของชั้นเคลือบฟอสฟอรัสน้อย (3.9 wt%P) หลังจากอบอ่อนที่อุณหภูมิ 300°C 400°C และ 500°C นาน 1 ชั่วโมง

จากภาพแสดงโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ซึ่งชั้นเคลือบ as-deposited มีโครงสร้างเป็น nanocrystalline ประกอบด้วยสารละลายของแข็งของฟอสฟอรัสอยู่ในนิกเกิล มีขนาดเกรนประมาณ 3 นาโนเมตร

หลังจากอบอ่อนที่ 300°C แสดง diffraction pattern ที่มี nickel reflections เกิดขึ้นคือ Ni {111} {200} {220} {311} และ {222} ขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 7 นาโนเมตร

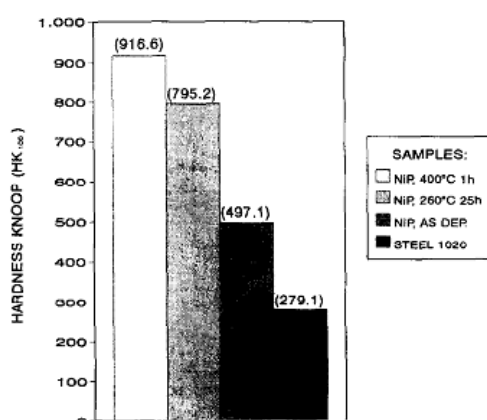
หลังจากอบอ่อนที่ 400°C เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างพื้น (Matrix) กลายเป็น 2 เฟส ประกอบด้วย Ni<sub>3</sub>P มีโครงสร้าง b.c.t. และ Ni มีโครงสร้าง f.c.c. เกรนของนิกเกิลจะโตขึ้นจนมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 32 นาโนเมตร และเกิดการแยกตัวของฟอสฟอรัสบริเวณขอบเกรน และ

บริเวณที่เป็นจุดเชื่อมต่อกันของ 3 เกรน ทำให้เกิดบริเวณที่มีฟอสฟอรัสสูง (P-rich zones) และเกิดการตกผลึกของ  $\text{Ni}_3\text{P}$  เมื่อบริเวณที่มีฟอสฟอรัสสูงมีปริมาณฟอสฟอรัสมากเพียงพอ

เหนืออุณหภูมิ  $400^\circ\text{C}$  ขนาดเกรนของนิกเกิล และ  $\text{Ni}_3\text{P}$  จะโตขึ้นระหว่างกรรมวิธีทางความร้อน จนอาจจะมีขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 50 นาโนเมตร และเนื่องจากการอบอ่อนทำในบรรยากาศปกติที่ไม่ได้ปกคลุมด้วยแก๊สเฉื่อย จึงเกิดการทำปฏิกิริยาของนิกเกิลกับออกซิเจนกลายเป็น  $\text{NiO}$  เป็นฟิล์มบางๆอยู่บนชั้นเคลือบ

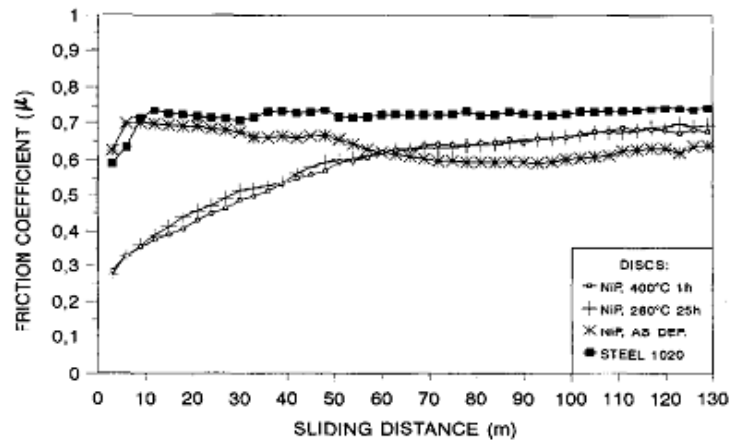
โครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปของชั้นเคลือบฟอสฟอรัสปานกลาง และฟอสฟอรัสมาก ก็จะมีคล้ายคลึงกับชั้นเคลือบฟอสฟอรัสน้อย [2]

ปี ค.ศ.1996 M.H. Staia, E.J. Castillo, E.S. Puchi, B. Lewis และ H.E. Hintermann ได้ทำการศึกษาความต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบนิกเกิล-ฟอสฟอรัสที่ชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า



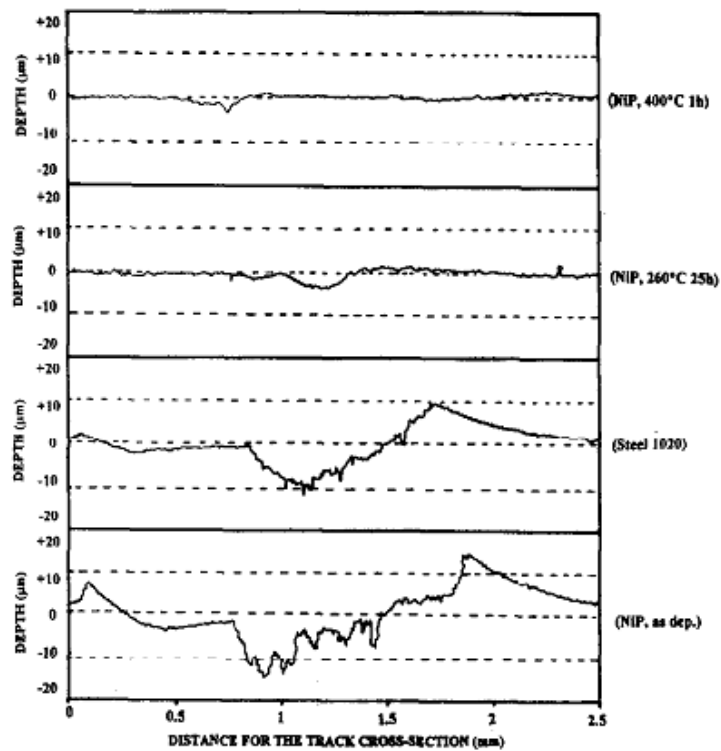
ภาพที่ 2.16 ค่าความแข็งของชิ้นงานตัวอย่างที่ทำการทดลอง

ชิ้นงานตัวอย่างหลังจากชุบเคลือบผิวมีปริมาณฟอสฟอรัสอยู่ในชั้นเคลือบประมาณ 6.7% และนำไปอบชุบทางความร้อนที่อุณหภูมิ  $400^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ  $260^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 25 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปวัดความแข็งเปรียบเทียบกับชิ้นงาน as-deposited ค่าความแข็งสูงสุด 0.63 GPa คือชิ้นงานที่อบชุบทางความร้อนที่อุณหภูมิ  $400^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพราะว่าการตกผลึกของสารประกอบเชิงโลหะชนิด  $\text{Ni}_3\text{P}$  ซึ่งมีความแข็งสูงฝังอยู่ในโครงสร้างพื้นนิกเกิลที่มีความเหนียว ส่วนชิ้นงานอบชุบที่  $260^\circ\text{C}$  เวลา 25 ชั่วโมง มีความแข็งที่สูงขึ้นเป็น 0.55 GPa

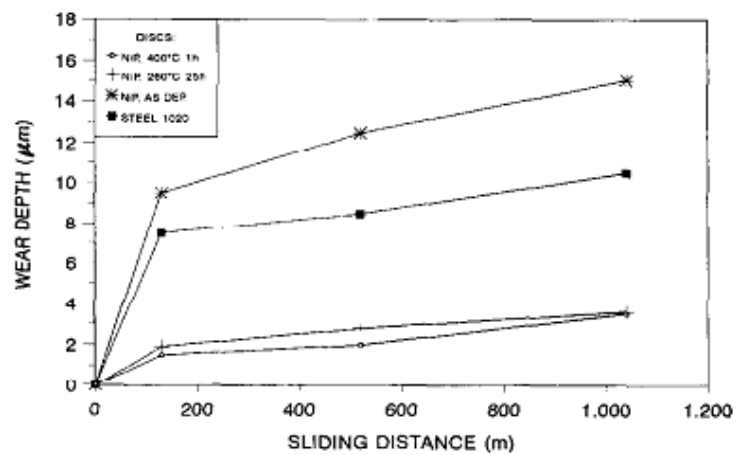


ภาพที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และระยะทางทดสอบการสึกหรอ

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นจาก 0.28 ถึงประมาณ 0.7 หลังจากผ่านระยะทาง 200 เมตร ค่า  $\mu$  ของชั้นเคลือบ as-deposited เพิ่มขึ้นอย่างมาก ขณะที่ชั้นเคลือบที่ผ่านการอบอ่อน ค่า  $\mu$  ค่อยๆเพิ่มขึ้น ซึ่งค่า  $\mu$  ที่เพิ่มขึ้นนี้ขึ้นอยู่กับระยะทางทดสอบที่มากกว่า 180 เมตร เนื่องจากความแตกต่างกันของการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวสัมผัสจริง (True contact area) และแรงเฉือน (Shear stress) ของแต่ละชั้นงานทดสอบ ซึ่งชั้นเคลือบ as-deposited มีความเหนียวมากกว่า และมีความแข็งที่น้อยกว่าชั้นเคลือบที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ทำให้เกิดเศษจากการทดสอบการสึกหรอ (wear debris) มากกว่า ทำให้มีพื้นผิวสัมผัสที่มากขึ้น



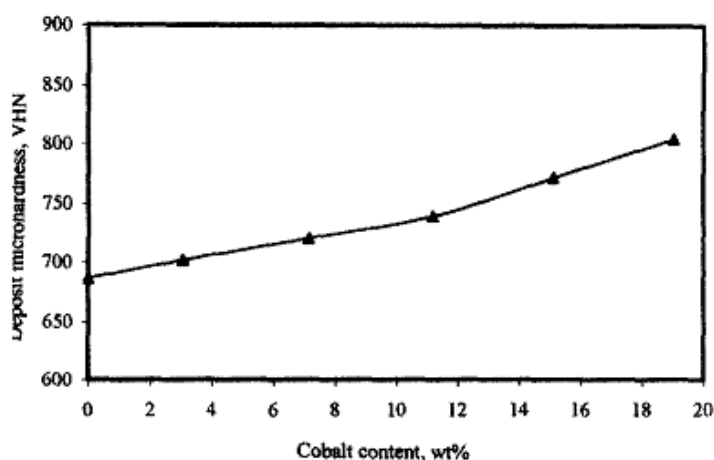
ภาพที่ 2.18 แสดง track depth profiles ของชิ้นงานที่ทดสอบความต้านทานการสึกหรอด้วยเครื่อง pin-on-disc ระยะทาง 1040 เมตร



ภาพที่ 2.19 การสึกหรอของชิ้นงานที่ทดสอบด้วยเครื่อง pin-on-disc

จากรูปที่ 2.18 และ 2.19 การสึกหรอเกิดมากที่สุดที่ชั้นเคลือบ as-deposited โดยมีความลึก 15 มิลลิเมตร เมื่อผ่านการทดสอบระยะทาง 1040 เมตร เนื่องจากมีความแข็งที่ต่ำ และมีการยึดติดของชั้นเคลือบที่ไม่ดี ส่วนชิ้นงานที่อบชุบที่ 400°C มีการสึกหรอน้อยที่สุด [16]

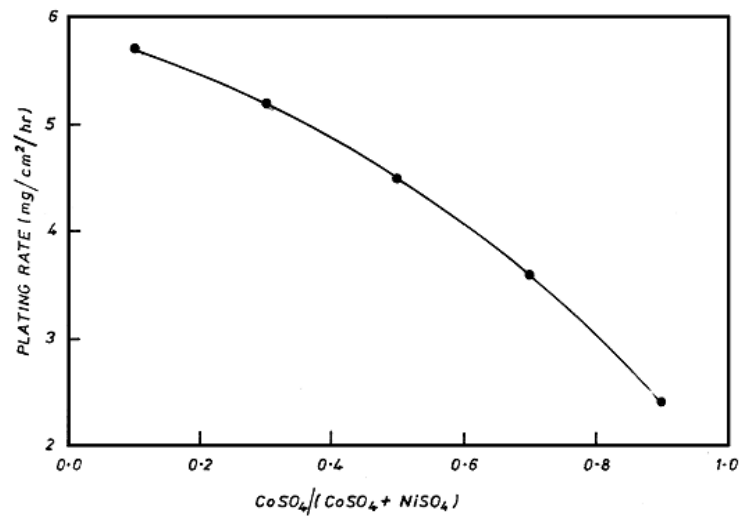
ปี ค.ศ.2003 I.H.M. Aly, M.M. Younan และ M.T. Nageeb ได้ศึกษาชั้นเคลือบนิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส ซึ่งปริมาณโคบอลต์ที่ต่างกันมีผลต่อค่าความแข็งของผิวเคลือบ



ภาพที่ 2.20 แสดงค่าความแข็งของชั้นเคลือบซึ่งขึ้นอยู่กัปริมาณโคบอลต์

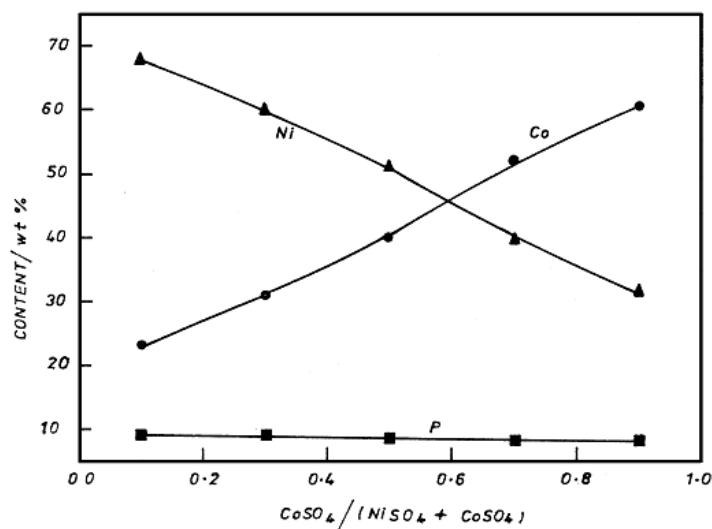
ค่าความแข็งของชั้นเคลือบ as-deposited นิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัสเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีโคบอลต์มากขึ้น ถึงแม้จะมีปริมาณฟอสฟอรัสลดลง เนื่องจากโคบอลต์จะยับยั้งการโตของผลึกขณะทำการชุบเคลือบผิว นอกจากนี้ยังทำให้เกรนละเอียดขึ้น มีการเรียงตัวของเกรนที่แน่นขึ้น และมีโครงสร้างผลึกที่ homogeneous [3]

ปี ค.ศ.2003 T.S.N. Sankara Narayanan, S. Selvakumar และ A. Stephen ทำการชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้าด้วยนิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส โดยศึกษาลักษณะของชั้นเคลือบที่ได้เมื่อมีปริมาณสารเคมีที่ใช้ในสารละลายแตกต่างกัน



ภาพที่ 2.21 อัตราส่วน  $\text{CoSO}_4 / (\text{CoSO}_4 + \text{NiSO}_4)$  ที่ส่งผลต่ออัตราการเคลือบ

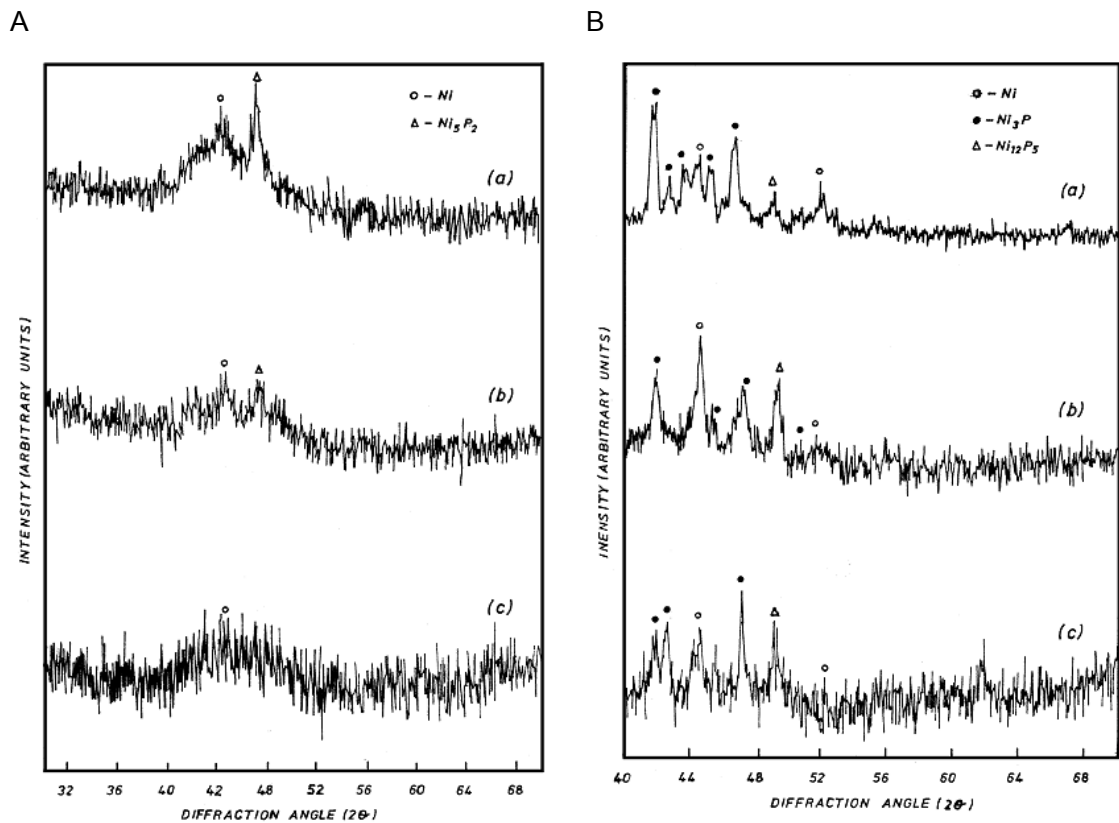
จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีอัตราส่วนของ  $\text{CoSO}_4 / (\text{CoSO}_4 + \text{NiSO}_4)$  เพิ่มขึ้น จะทำให้ อัตราการเคลือบลดลง เนื่องจากนิกเกิลมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาเคมีได้ดีกว่าโคบอลต์



ภาพที่ 2.22 อัตราส่วน  $\text{CoSO}_4 / (\text{CoSO}_4 + \text{NiSO}_4)$  ที่ส่งผลต่อส่วนผสมทางเคมีของชั้นเคลือบ

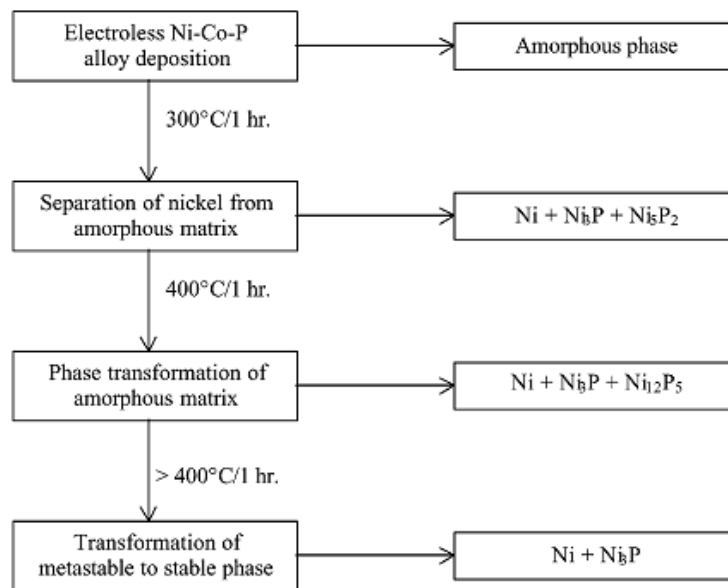
จากภาพแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วน  $\text{CoSO}_4 / (\text{CoSO}_4 + \text{NiSO}_4)$  มีผลต่อปริมาณนิกเกิล โคบอลต์ และฟอสฟอรัส เมื่อเพิ่มอัตราส่วนนี้จะทำให้ชั้นเคลือบมีปริมาณโคบอลต์เพิ่มขึ้น แต่ ปริมาณนิกเกิลจะลดลง ส่วนฟอสฟอรัสจะลดลงเล็กน้อย ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับการทดลองของ W.L. Liu [17] และ I.H.M. Aly [3]





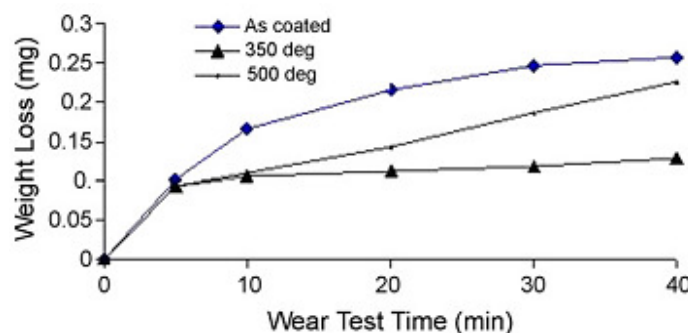
ภาพที่ 2.23 XRD pattern ของอัตราส่วน  $\text{CoSO}_4 / (\text{CoSO}_4 + \text{NiSO}_4)$  เป็น 0.3 (a), 0.5 (b), 0.7 (c) และภาพ A ผ่านการอบอ่อนที่  $300^\circ\text{C}$  ส่วนภาพ B ผ่านการอบอ่อนที่  $400^\circ\text{C}$  เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง

ก่อนการอบอ่อนโครงสร้างเป็น amorphous หลังจากอบอ่อนที่  $300^\circ\text{C}$  เกิดเฟส  $\text{Ni}_5\text{P}_2$  มีโครงสร้าง hexagonal หลังอบอ่อนที่  $400^\circ\text{C}$  เกิดเฟส  $\text{Ni}_{12}\text{P}_5$  มีโครงสร้าง tetragonal เนื่องจากในงานวิจัยนี้ชั้นเคลือบมีปริมาณฟอสฟอรัสสูง ดังนั้นเมื่อผ่านกรรมวิธีทางความร้อนทำให้เกิดการแยกตัวของฟอสฟอรัสออกจากเกรนของนิกเกิลเกิดมาที่ขอบเกรนปริมาณมาก ซึ่งทำให้เกิดการตกผลึกของ  $\text{Ni}_5\text{P}_2$  และ  $\text{Ni}_{12}\text{P}_5$  ซึ่งเฟส metastable นี้จะเปลี่ยนเป็นเฟส  $\text{Ni}_3\text{P}$  ซึ่งเป็นเฟสที่ stable เมื่ออบอ่อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น สามารถแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.23 [18]



ภาพที่ 2.24 แผนผังของการเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสของชั้นเคลือบนิเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัสเมื่อผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 300°C, 400°C และ >400°C

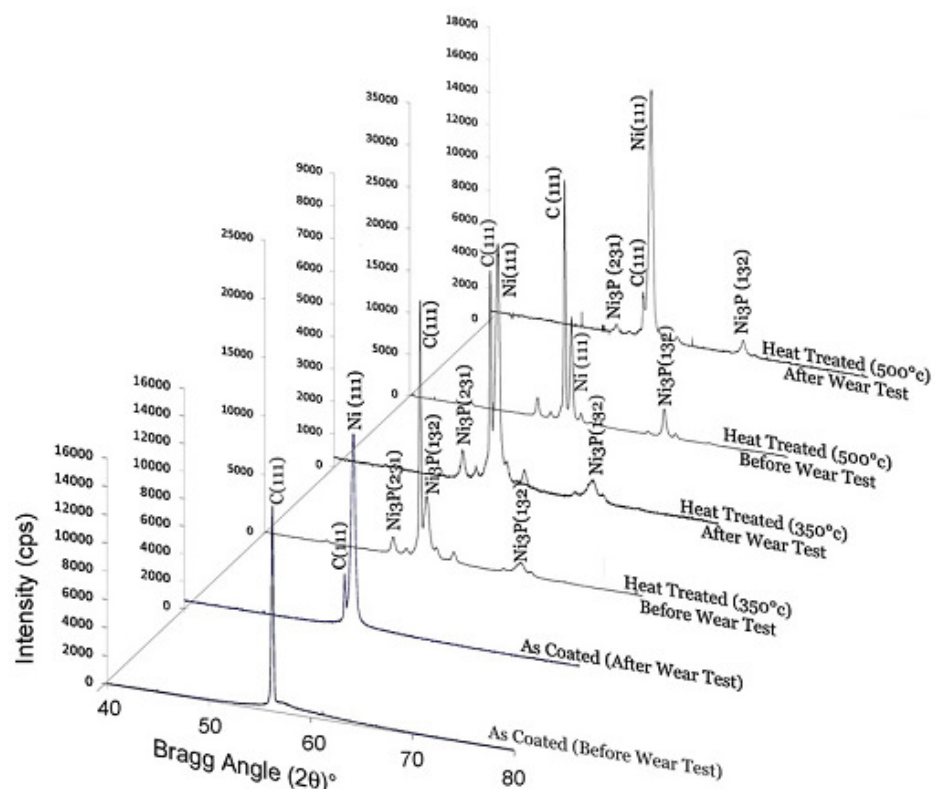
ปี ค.ศ.2009 J.T. Winowlin Jappes, B.Ramamoorthy และ P. Kesavan Nair ทำการศึกษาความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบที่ชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าด้วยนิเกิล-ฟอสฟอรัส และใส่ผงเพชรเข้าไปในผิวเคลือบด้วย



ภาพที่ 2.25 น้ำหนักของชั้นเคลือบที่สูญเสียไปเมื่อทดสอบการสึกหรอที่เวลาต่างๆ

ความต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบนิเกิล-ฟอสฟอรัส/ผงเพชร ตรวจสอบจากน้ำหนักที่ลดลงไปของชิ้นงานทดสอบ โดยทำการทดสอบการสึกหรอกับชิ้นงาน as-deposited และชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 350°C และ 500°C จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบ as-deposited เกิดการสึกหรอมากที่สุด ส่วนชิ้นงานอบอ่อนที่ 350°C มีความต้านทานการ

สึกหรอดีที่สุดใน เนื่องจากหลังจากอบอ่อนที่  $350^{\circ}\text{C}$  ชั้นเคลือบจะเกิดการตกผลึกใหม่อย่างสมบูรณ์ การอบอ่อนที่  $500^{\circ}\text{C}$  จะเกิดการโตขึ้นของเกรนทำให้โครงสร้างพื้นผิวมีความแข็งแรงลดลง แต่ก็ยังมีความต้านทานการสึกหรอดีกว่าชั้นเคลือบ as-deposited เพราะว่ามีผลึกของ  $\text{Ni}_3\text{P}$  ซึ่งเป็นเฟสที่แข็งอยู่ในเนื้อพื้น (matrix) โดยการสึกหรอช่วง 5 นาทีแรกเกิดสูงมากเนื่องจากด้านบนสุดของชั้นเคลือบมีการยึดติดของชั้นเคลือบกับผงเพชรที่ไม่แน่น



ภาพที่ 2.26 XRD patterns ของชั้นเคลือบนิเกิล-ฟอสฟอรัส/ผงเพชร แบบ as-deposited และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่  $350^{\circ}\text{C}$  และ  $500^{\circ}\text{C}$  ทั้งก่อนและหลังทดสอบการสึกหรอ

เนื่องจากการทดสอบการสึกหรอไม่สามารถบอกได้ว่าน้ำหนักที่สูญเสียไปนั้นเป็นของผงเพชรหรือเนื้อพื้น จึงทำการตรวจสอบด้วย XRD แสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่  $350^{\circ}\text{C}$  และ  $500^{\circ}\text{C}$  เกิดสารประกอบเชิงโลหะชนิด  $\text{Ni}_3\text{P}$  และหลังจากทดสอบการสึกหรอ

ยังคงมีผงเพชรเหลืออยู่ในชั้นเคลือบมากกว่าชั้นเคลือบ as-deposited โดยเฉพาะในชั้นเคลือบที่อบอ่อน  $350^{\circ}\text{C}$  [12]

จากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้แสดงให้เห็นว่า ชั้นเคลือบนิกเกิล-ฟอสฟอรัส มีความแข็งแรง ความต้านทานการสึกหรอ และความต้านทานการกัดกร่อนที่สูง โดยสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณฟอสฟอรัสในชั้นเคลือบ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างจุลภาค และสามารถทำให้ชั้นเคลือบมีสมบัติทางกลดีขึ้นได้ โดยการใส่โคบอลต์จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับชั้นเคลือบ และการใส่ผงเพชรเข้าไปในชั้นเคลือบจะช่วยเพิ่มความต้านทานการสึกหรอให้สูงขึ้น นอกจากนี้การนำชั้นเคลือบไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนจะสามารถเพิ่มทั้งความแข็งแรง และความต้านทานการสึกหรอให้สูงขึ้นได้

งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาปริมาณของโคบอลต์ และอุณหภูมิที่ใช้ในกรรมวิธีทางความร้อน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อทั้งโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของชั้นเคลือบอันได้แก่ ค่าความแข็งแรง และความต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบ

## บทที่ 3

### ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง

#### 3.1 เครื่องมือที่ใช้สำหรับทำงานวิจัย

การศึกษางานวิจัยนี้จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีต่างๆ สำหรับเตรียมผิวชิ้นงาน การชุบเคลือบผิวทั้งแบบใช้ไฟฟ้าและไม่ใช้ไฟฟ้า กรรมวิธีทางความร้อน การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคหรือเฟสต่างๆ และการทดสอบสมบัติทางกล ซึ่งใช้เครื่องมือที่จำเป็นดังนี้

##### 1. อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้สำหรับเตรียมผิวชิ้นงาน ได้แก่

- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 10%wt
- กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 14%wt
- กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ความเข้มข้น 10%vol
- เครื่องอัลตราโซนิค

##### 2. อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้สำหรับการชุบเคลือบผิวแบบใช้ไฟฟ้า ได้แก่

- เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิสารละลายอิเล็กโทรไลต์
- สารละลายอิเล็กโทรไลต์นิกเกิล-ไตรโครม
- แผ่นแพลทินัม

##### 3. อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้สำหรับการชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้า ได้แก่

- เครื่องควบคุมอุณหภูมิสารละลายอิเล็กโทรไลต์
- สารละลายอิเล็กโทรไลต์นิกเกิล-ฟอสฟอรัส
- สารละลายอิเล็กโทรไลต์นิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส

##### 4. อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในกรรมวิธีทางความร้อน ได้แก่

- เตาให้ความร้อนแบบ Tube (Furnace Tube)
- Crucible ลักษณะ Boat

- ก๊าซเฉื่อยเลือกใช้ก๊าซไนโตรเจน

5. อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้สำหรับเตรียมผิวชิ้นงานเพื่อศึกษาความหนาชั้นเคลือบ ได้แก่

- กระดาษทรายขัด เบอร์ 180, 240, 400, 800, 1200, 2500 และผ้าสักหลาด
- ผงเพชรขนาด 6 และ 3 ไมครอน
- เครื่องขัดผิวโลหะ
- เครื่องตัดชิ้นตัวอย่างความเร็วต่ำ (Low speed cutting Machine)

6. เครื่องมือที่ใช้สำหรับตรวจสอบและทดสอบวัสดุ

- กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope) ใช้ศึกษาความหนาของชั้นเคลือบ และโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้น

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM) ใช้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคขนาดเล็ก ขนาดของเกรน รวมทั้งศึกษาชิ้นงานบริเวณพื้นที่ที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอ

- EDX (Energy dispersive X-Ray) ใช้ตรวจสอบชนิดธาตุของเฟสภายในโครงสร้างจุลภาค เพื่อวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบ และปริมาณธาตุผสม

- เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD) เพื่อตรวจสอบหาชนิดของสารประกอบที่เกิดขึ้น เมื่อผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

- เครื่องวัดความแข็ง (Microhardness tester) ใช้ทดสอบความแข็งของชั้นเคลือบที่ชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าทั้งก่อน และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

- Ball-on-disc ใช้ทดสอบหาการสึกหรอของชั้นเคลือบที่ชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าทั้งก่อน และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

- Taber Abraser wear ใช้ทดสอบการสึกหรอแบบ abrasive wear ของชั้นเคลือบที่ผ่านการชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

### 3.2 ระเบียบวิธีการวิจัย

#### ส่วนที่ 1 การศึกษากระบวนการชุบเคลือบผิวแบบใช้ไฟฟ้า ด้วยนิกเกิลสไตรค์

##### 1.1 การเตรียมผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430

ก่อนทำการชุบเคลือบผิววัสดุพื้นต้องผ่านขั้นตอนการทำความสะอาดผิวให้มีความสะอาดปราศจากสิ่งสกปรก เนื่องจากส่งผลให้ได้ชั้นเคลือบที่มีการยึดเกาะกับวัสดุพื้นได้ดี โดยนำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมไปแช่ในโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10%wt ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 10 นาที แล้วล้างด้วยน้ำกลั่น หลังจากนั้นนำไปแช่ในกรดไฮโดรคลอริก 14%wt ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 20 นาที แล้วล้างกรดออกด้วยน้ำกลั่น ต่อจากนั้นนำไปชุบเคลือบผิวด้วยนิกเกิลสไตรค์

##### 1.2 การชุบเคลือบผิวแบบใช้ไฟฟ้า ด้วยนิกเกิลสไตรค์

เตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์นิกเกิลสไตรค์ ชนิดซัลเฟต โดยมีส่วนผสมดังนี้

- น้ำกลั่น
- นิกเกิลซัลเฟต ( $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) 250 กรัม/ลิตร
- กรดกำมะถัน ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 25 มิลลิลิตร/ลิตร
- ไฟฟ้ากระแสตรง 16-22 แอมป์/ตารางเดซิเมตร
- อุณหภูมิ 35-40 องศาเซลเซียส
- เวลา 5-10 นาที

ขั้นตอนนี้จะทดลองหาตัวแปรต่างๆ ได้แก่ กระแสไฟ อุณหภูมิ และเวลา ในการชุบเคลือบผิวที่เหมาะสม เพื่อให้ชั้นเคลือบมีการยึดติดกับวัสดุพื้นที่ดี โดยหลังจากชุบเคลือบผิวด้วยนิกเกิลสไตรค์เสร็จแล้ว ใช้น้ำกลั่นล้างชิ้นงานให้สะอาด และจึงทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป

#### ส่วนที่ 2 การศึกษากระบวนการชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

##### 2.1 กระบวนการชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้า ด้วยนิกเกิล-ฟอสฟอรัส

การเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์นิกเกิล-ฟอสฟอรัส มีส่วนผสมดังนี้

- น้ำกลั่น
- โซเดียมซิเตรต ทำหน้าที่เป็น complexing agent

- แอมโมเนียมซัลเฟต                      ทำหน้าที่เป็น buffering agent
- นิกเกิลซัลเฟต                              ทำหน้าที่เป็น source of nickel
- ไทโอยูเรีย                                    ทำหน้าที่เป็น stabilizer
- โซเดียมไฮโปฟอสไฟต์                    ทำหน้าที่เป็น reducing agent
- อุณหภูมิ                                      85 องศาเซลเซียส
- เวลา    2 ชั่วโมง

ทำการผสมสารละลายที่อุณหภูมิห้อง โดยใส่สารเคมีตามลำดับ และกวนให้สารเคมีละลายหมดและใส่สารเคมีอื่นต่อไป ซึ่งขั้นตอนนี้ต้องการชั้นเคลือบที่มีปริมาณฟอสฟอรัสน้อย เพราะมีความต้านทานการสึกหรอที่สูง

## 2.2 กระบวนการชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้า ด้วยนิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส

ซึ่งการเลือกใช้โคบอลต์เป็นธาตุผสมที่ 3 เนื่องจากพบว่าสามารถช่วยเพิ่มความแข็งให้กับชั้นเคลือบได้ และยังมีงานวิจัยไม่มากนักที่ศึกษาการชุบเคลือบผิวที่มีโคบอลต์ผสมอยู่ เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นเคลือบที่มีทั้งสแตน

การเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์นิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส มีส่วนผสมดังนี้

- น้ำกลั่น
- โซเดียมซิเตรต                              ทำหน้าที่เป็น complexing agent
- แอมโมเนียมซัลเฟต                      ทำหน้าที่เป็น buffering agent
- นิกเกิลซัลเฟต                              ทำหน้าที่เป็น source of nickel
- โคบอลต์ซัลเฟต                              ทำหน้าที่เป็น source of cobalt
- ไทโอยูเรีย                                    ทำหน้าที่เป็น stabilizer
- โซเดียมไฮโปฟอสไฟต์                    ทำหน้าที่เป็น reducing agent
- อุณหภูมิ                                      85 องศาเซลเซียส
- เวลา    2 ชั่วโมง

วิธีผสมสารละลายเช่นเดียวกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์นิกเกิล-ฟอสฟอรัส โดยขั้นตอนนี้จะทำการทดลอง 4 ส่วนผสม เพื่อศึกษาปริมาณโคบอลต์ในชั้นเคลือบที่แตกต่างกันว่าส่งผลต่อ



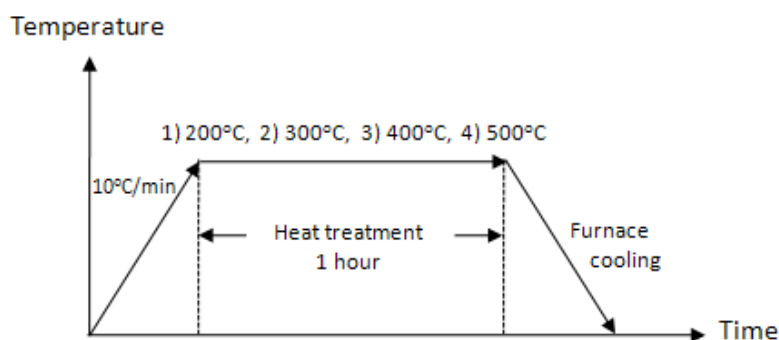
ความแข็ง และความต้านทานการสึกหรออย่างไร โดยใช้อัตราส่วนของจำนวนโมล นิกเกิลซัลเฟต ต่อ โคบอลต์ซัลเฟต ดังนี้

$$- \text{CoSO}_4 / (\text{NiSO}_4 + \text{CoSO}_4) = 0.1, 0.3, 0.5 \text{ และ } 0.7$$

ส่วนผสมทั้ง 4 จะเพิ่มปริมาณโคบอลต์ซัลเฟตมากขึ้นเรื่อยๆ และลดปริมาณนิกเกิลซัลเฟตลงเช่นกัน ซึ่งจะทำให้มีปริมาณโคบอลต์ในชั้นเคลือบมากขึ้น

### ส่วนที่ 3 กรรมวิธีทางความร้อน

ชิ้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบผิวทั้งหมด จะนำมาผ่านกรรมวิธีทางความร้อนโดยใช้เตาให้ความร้อนแบบ Tube furnace ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน และนำชิ้นงานวางบน crucible แบบ boat หลังจากนั้นให้ความร้อนโดยทำการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ 200°C 300°C 400°C และ 500°C ใช้อัตราการให้ความร้อน 10°C/min เพื่อศึกษาอุณหภูมิการตกผลึกของสารประกอบเชิงโลหะ ซึ่งจะส่งผลอย่างมากต่อความแข็ง และความต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบ



ภาพที่ 3.1 กรรมวิธีทางความร้อนของชั้นเคลือบที่ชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรในการชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้า และกรรมวิธีทางความร้อน

ส่วนผสม	สัญลักษณ์	as-plated	กรรมวิธีทางความร้อน			
			200°C	300°C	400°C	500°C
Ni-P	NP					
Ni-Co-P (0.1)	NCP1					
Ni-Co-P (0.3)	NCP3					
Ni-Co-P (0.5)	NCP5					
Ni-Co-P (0.7)	NCP7					

#### ส่วนที่ 4 การตรวจสอบชั้นเคลือบ

##### 4.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

หลังจากผ่านการชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้า ชิ้นงานต้องผ่านการตรวจสอบลักษณะของโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด หาปริมาณธาตุผสมที่อยู่ในชั้นเคลือบด้วยเครื่อง EDX และวัดความหนาชั้นเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง โดยทำการตัดแบบขวางด้วยเครื่องตัด Low speed แล้วขัดผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 ถึง 2500 และขัดด้วยผ้าสักหลาดกับผงเพชรขนาด 6 และ 3 ไมครอน

##### 4.2 การตรวจสอบความแข็ง

หลังจากผ่านการชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้าทั้งแบบนิกเกิล-ฟอสฟอรัส นิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส (As-deposited) และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน จะนำชิ้นงานทั้งหมดทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง Microhardness tester โดยตั้งค่าน้ำหนักกด (Load) 100 กรัม เพื่อให้รอยกดลึกถึงชั้นของวัสดุพื้น เนื่องจากจะส่งผลให้ค่าความแข็งของชั้นเคลือบที่ได้ผิดพลาดและใช้เวลาในการกดวัดความแข็ง 20 วินาที โดยแต่ละชิ้นงานจะทำการวัด 6 ครั้ง ซึ่งตำแหน่งของการวัดต้องห่างกันอย่างน้อย 2.5 เท่าของเส้นทแยงมุมของรอยกดเดิม

#### 4.3 การตรวจสอบความต้านทานการสึกหรอ

##### 4.3.1 การทดสอบ ball-on-disc

ชิ้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้าทั้งแบบนิกเกิล-ฟอสฟอรัส นิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส (As-deposited) จะนำมาทดสอบทดสอบการสึกหรอทุกชิ้น และชิ้นงานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนชิ้นงานที่มีความแข็งมากที่สุด จะนำมาทดสอบความต้านทานการสึกหรอด้วยเครื่อง Ball-on-disc ซึ่งบอลทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ โดยใช้น้ำหนักกด 10 N. ความเร็ว 200 rpm ระยะทางทดสอบ 500 m. และทดสอบในสถานะที่ไม่มี lubricant ซึ่งการทดสอบสามารถวัดสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และปริมาตรการสึกหรอ เพื่อศึกษาผลของธาตุผสมในชั้นเคลือบต่อความต้านทานการสึกหรอ

โดยพื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบสามารถหาได้จากเครื่อง Profilometer ซึ่งลักษณะการทำงานของเครื่องจะใช้หัว stylus ลากไปบนผิวชิ้นงาน และสามารถแสดงภาพการสึกหรอออกมาได้ทั้งแบบ 2 มิติ และแบบ 3 มิติ

##### 4.3.2 การทดสอบ Taber abraser wear

เป็นวิธีการทดสอบการสึกหรอแบบ Abrasive wear โดยมีล้อขัด (CS-10) ทำหน้าที่ทดสอบชิ้นงานที่หมุนด้วยความเร็วคงที่ ใช้น้ำหนักกด 1,000 กรัม และใช้การวัดน้ำหนักที่หายไปเมื่อผ่านการทดสอบทุกๆ 1000 รอบ เป็นสิ่งบ่งบอกความต้านทานการสึกหรอของวัสดุ

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปราย

#### 4.1 การชุบเคลือบผิวแบบใช้ไฟฟ้า ด้วยวิธีนิกเกิลสไตรค์

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าไม่สามารถชุบลงบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมได้โดยตรง เนื่องจากมีความสามารถในการยึดติดที่ต่ำกว่าชั้นโครเมียมออกไซด์ จึงมีความจำเป็นต้องชุบชั้นรองพื้นด้วยวิธีนิกเกิลสไตรค์ โดยมีรายละเอียดการทดลอง ดังนี้

ส่วนผสมของสารละลายนิกเกิลสไตรค์

- น้ำกลั่น

- นิกเกิลซัลเฟต ( $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) 250 กรัม/ลิตร

- กรดกำมะถัน ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 25 มิลลิลิตร/ลิตร

- ไฟฟ้ากระแสตรง 16 แอมป์/ตารางเดซิเมตร

- อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

- เวลา 10 นาที



ภาพที่ 4.1 ภาพตัดขวางของชั้นเคลือบที่ชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

จากภาพแสดงให้เห็นว่าสามารถชุบชั้นเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าลงบนเหล็กกล้าไร้สนิมได้โดยใช้การชุบนิกเกิลสไตรค์เป็นชั้นรองพื้น

## 4.2 การชุบเคลือบนิกเกิล-ฟอสฟอรัส และนิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส แบบไม่ใช้ไฟฟ้า

โดยมีรายละเอียดการทดลอง และการวิเคราะห์ชั้นเคลือบที่มีปริมาณธาตุผสมที่แตกต่างกัน ซึ่งจะมีผลต่อสมบัติทางกลของชั้นเคลือบ ดังนี้

### 4.2.1 ส่วนผสมทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนจำนวนโมล $\text{CoSO}_4 / (\text{CoSO}_4 + \text{NiSO}_4)$

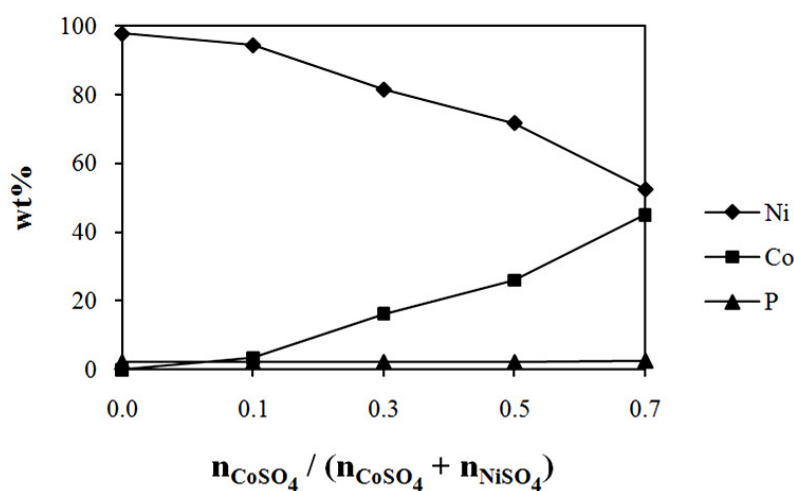
ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลองให้ชั้นเคลือบที่ต้องการศึกษามีปริมาณของโคบอลต์ที่แตกต่างกัน โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนจำนวนโมลของสารเคมี  $\text{CoSO}_4 / (\text{CoSO}_4 + \text{NiSO}_4) = 0.1, 0.3, 0.5$  และ  $0.7$  และวิเคราะห์ส่วนผสมในเชิงปริมาณด้วย Energy dispersive X-Ray นอกจากนี้ได้กำหนดชื่อของชั้นเคลือบที่มีปริมาณโคบอลต์ต่างๆ เพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุ ดังนี้

ตารางที่ 4.1 การทดลอง และส่วนผสมทางเคมีของชั้นเคลือบนิกเกิล-ฟอสฟอรัส และนิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส

Type of deposit	Electroless Ni-P, Ni-Co-P				
Sample designation	NP	NCP1	NCP3	NCP5	NCP7
Mol ratio of $\text{CoSO}_4 / \text{CoSO}_4 + \text{NiSO}_4$	0	0.1	0.3	0.5	0.7
<i>Bath composition (g/l)</i>					
$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	40	35.96	27.97	19.98	11.99
$\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	-	4.27	12.82	21.36	29.91
$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	35	35	35	35	35
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	30	30	30	30	30
Thiourea 0.01% (ml/l)	8	8	8	8	8
$\text{Na}_2\text{H}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	20	20	20	20	20
<i>Operating Conditions</i>					
pH	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0

Temperature	85±1 °C	85±1 °C	85±1 °C	85±1 °C	85±1 °C
Time	120 min	120 min	120 min	120 min	120 min
<i>Deposit composition</i>					
Nickel (wt%)	97.805	94.467	81.54	71.79	52.39
Cobalt (wt%)	0	3.377	16.235	26.02	44.99
Phosphorus (wt%)	2.195	2.157	2.22	2.19	2.615

เมื่อนำปริมาณธาตุผสมมาเขียนแสดงความสัมพันธ์กับอัตราส่วนจำนวนโมลของ  $\text{CoSO}_4 / (\text{CoSO}_4 + \text{NiSO}_4)$  จะแสดงให้เห็นว่านิเกิลเกิดมีปริมาณลดลง ส่วนโคบอลต์มีปริมาณเพิ่มขึ้น และฟอสฟอรัสมีปริมาณที่เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย เมื่อมีอัตราส่วนจำนวนโมลของ  $\text{CoSO}_4 / (\text{CoSO}_4 + \text{NiSO}_4)$  เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.2



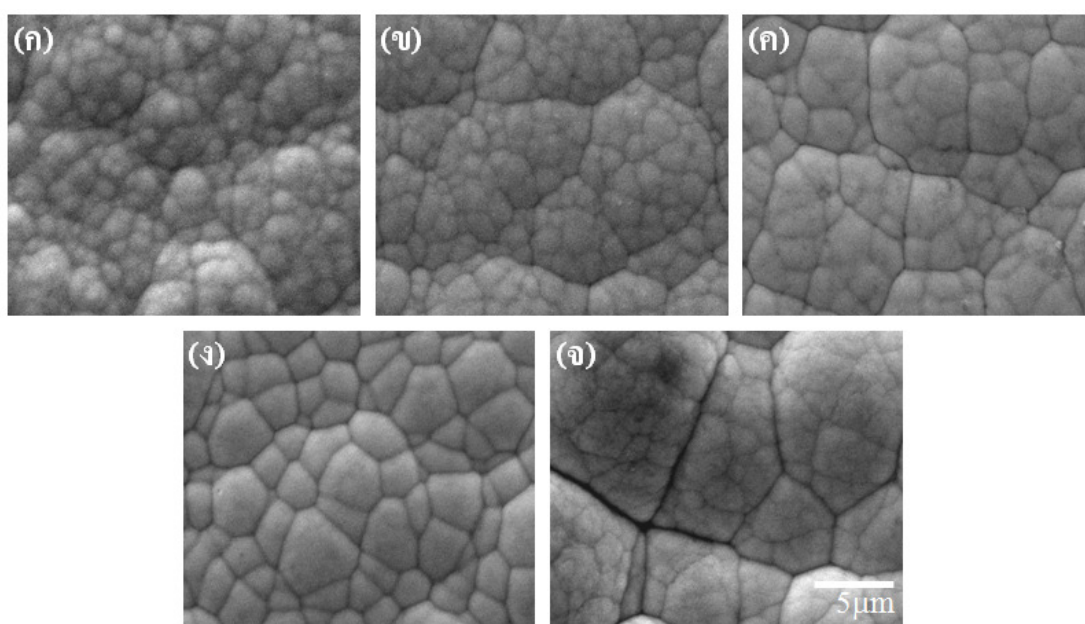
ภาพที่ 4.2 ปริมาณธาตุผสมที่เปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนจำนวนโมลของ  $\text{CoSO}_4 / (\text{CoSO}_4 + \text{NiSO}_4)$

โดยโคบอลต์มีปริมาณเพิ่มขึ้น และนิเกิลเกิดมีปริมาณลดลงนั้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ  $\text{CoSO}_4 / (\text{CoSO}_4 + \text{NiSO}_4)$  ทำให้  $\text{CoSO}_4$  ซึ่งเป็นสารเคมีที่จะเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็น  $\text{Co}^{2+}$  ในสารละลาย และจะทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนกลายเป็น Co ในชั้นเคลือบ มีปริมาณที่สูงขึ้น และ  $\text{NiSO}_4$  ในสารละลายก็มีปริมาณลดลงเช่นกัน ทำให้มี  $\text{Ni}^{2+}$  ในสารละลายน้อยลง จึงส่งผลให้มี

โอกาสที่  $\text{Ni}^{2+}$  จะทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนแล้วไปเคลือบอยู่บนชิ้นงานน้อยลงเช่นกัน ส่วน P ไม่เปลี่ยนแปลงมากเพราะมีปริมาณสารเคมี  $\text{Na}_2\text{H}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ซึ่งเป็นแหล่งของ P ในสารละลาย เท่ากันทุกส่วนผสม

#### 4.2.2 ลักษณะของชั้นเคลือบที่มีปริมาณโคบอลต์แตกต่างกัน

ปริมาณโคบอลต์ที่เปลี่ยนแปลงไปยังส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบด้วย โดยใช้การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ซึ่งแสดงในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบที่ชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า (ก) NP, (ข) NCP1, (ค) NCP3, (ง) NCP5 และ (จ) NCP7

จากภาพที่ 4.3(ก) คือลักษณะของโครงสร้างจุลภาคที่ชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าของนิกเกิล-ฟอสฟอรัส ซึ่งจากภาพที่แสดงให้เห็นไม่ใช่เกรนของวัสดุ แต่เป็นโครงสร้างที่เรียกว่า nodule และ cluster ซึ่งเมื่อมีปริมาณโคบอลต์มากขึ้น ภาพที่ 4.3 (ข-จ) จะสามารถสังเกตเห็น cluster ได้ชัดเจนมากขึ้น โดยกล่าวได้ว่าปริมาณโคบอลต์ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบนิกเกิล-ฟอสฟอรัสที่ชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

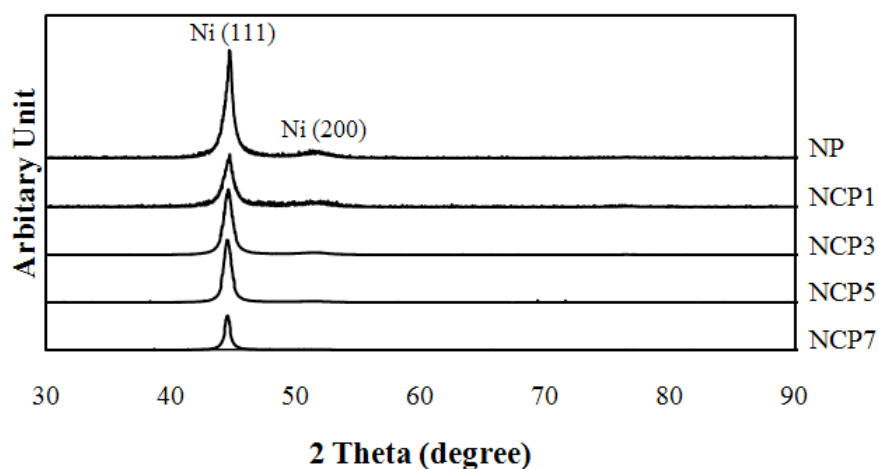
#### 4.2.3 การตรวจสอบขนาดเกรนและเฟสที่เกิดขึ้นของเคลือบ as-deposited

งานวิจัยนี้ใช้วิธี Integral breath method ในการคำนวณหาขนาดเกรน โดยผลจากการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ขนาดเกรนของชั้นเคลือบนิเกิล-ฟอสฟอรัส และนิเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส

ชั้นงาน	ขนาดเกรน (nm)
NP	4
NCP1	1
NCP3	5
NCP5	6
NCP7	4

การตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นภายหลังการชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้า โดยใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งแสดงในภาพที่ 4.4 พบว่าเมื่อมีปริมาณโคบอลต์ในชั้นเคลือบมากขึ้น XRD pattern จะมีความสูงของค่า intensity ที่ลดลง และพบเพียงเฟสของนิเกิลเพียงอย่างเดียว ส่วนโคบอลต์และฟอสฟอรัสอยู่ในชั้นเคลือบในลักษณะสารละลายของแข็ง (Solid solution)

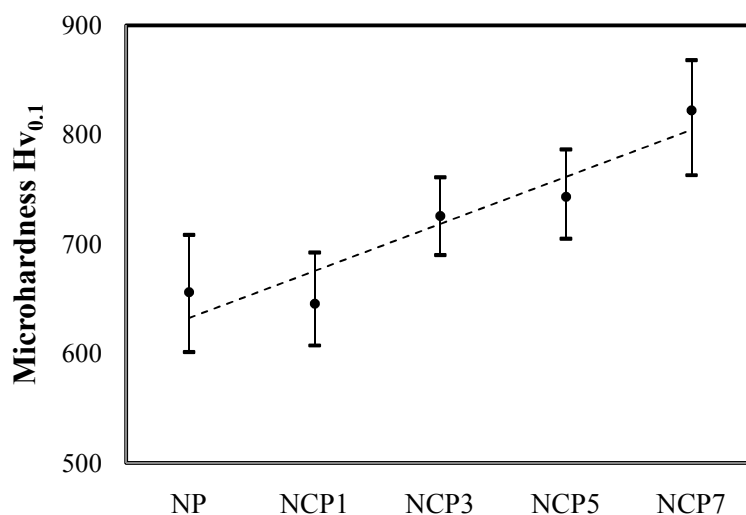


ภาพที่ 4.4 XRD pattern ของ NP, NCP1, NCP3, NCP5 และ NCP7



#### 4.2.4 การตรวจสอบความแข็งของชั้นเคลือบ as-deposited

ค่าความแข็งของชั้นเคลือบนิกเกิล-ฟอสฟอรัส และนิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส แสดงในภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 ความแข็งของชั้นเคลือบ as-deposited

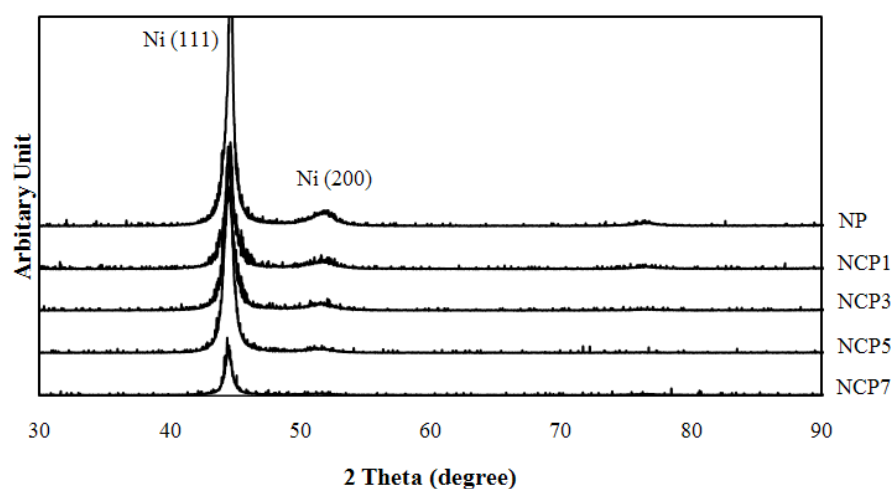
จากภาพที่ 4.5 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและปริมาณโคบอลต์ โดยที่ชั้นเคลือบที่มีปริมาณโคบอลต์มากขึ้นจะมีความแข็งที่สูงขึ้น ซึ่งความแข็งที่สูงขึ้นเนื่องมาจากกลไกการเพิ่มความแข็งแบบสารละลายของแข็ง (Solid solution strengthening) โดยที่ชั้นเคลือบ NP มีค่าความแข็ง 656  $Hv_{0.1}$  ซึ่งน้อยที่สุด และ NCP7 มีความแข็งมากที่สุด คือ 822  $Hv_{0.1}$

#### 4.3 กรรมวิธีทางความร้อนของโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัส และนิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส ที่ชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

งานวิจัยนี้ทำการทดลองส่วนของกรรมวิธีทางความร้อนโดยใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน และใช้เวลาในการทดลองเท่ากัน เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อค่าความแข็ง เนื่องจากอุณหภูมิมิมีผลต่อการเกิดสารประกอบเชิงโลหะ และยังส่งผลต่อเนื่องไปถึงสมบัติทางกลของชั้นเคลือบด้วย

#### 4.3.1 ผลของกรรมวิธีทางความร้อนของชั้นเคลือบนิกเกิล-ฟอสฟอรัส และ นิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิ 200°C

การศึกษากการเปลี่ยนแปลงของวัสดุหลังจากกรรมวิธีทางความร้อน โดยการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ดังแสดงในภาพที่ 4.6

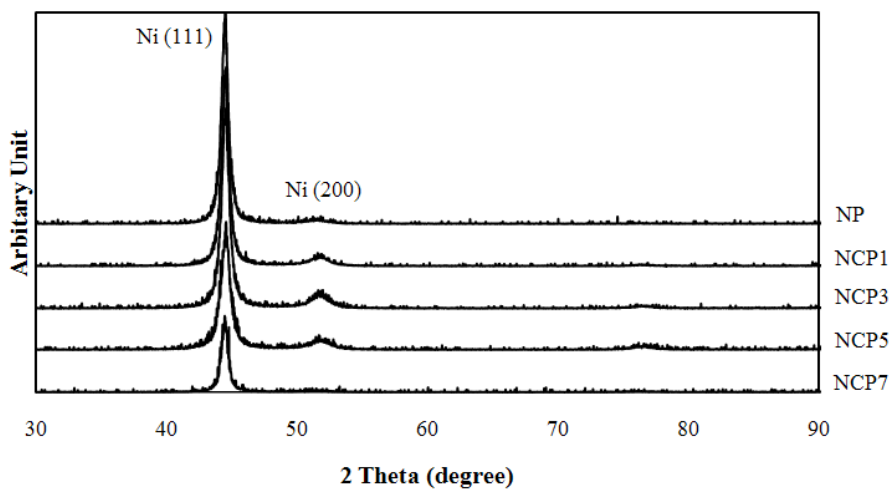


ภาพที่ 4.6 XRD pattern ของ NP, NCP1, NCP3, NCP5 และ NCP7 หลังจากกรรมวิธีทางความร้อนที่ 200°C

จาก XRD pattern ของ NP, NCP1, NCP3, NCP5 และ NCP7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ายังไม่มี การเปลี่ยนแปลงของเฟสหลังจากกรรมวิธีทางความร้อนที่ 200°C โดยพบเพียงแค่เฟสของนิกเกิล เท่านั้น เช่นเดียวกับชั้นเคลือบที่ไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน แต่ลักษณะของ XRD pattern มีค่า intensity ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของขนาดเกรน

#### 4.3.2 ผลของกรรมวิธีทางความร้อนของชั้นเคลือบนิกเกิล-ฟอสฟอรัส และ นิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิ 300°C

จากการตรวจสอบชั้นเคลือบที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 300°C ด้วยเครื่องวัดการ เลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เพื่อศึกษากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึก ดังแสดงในภาพที่ 4.7

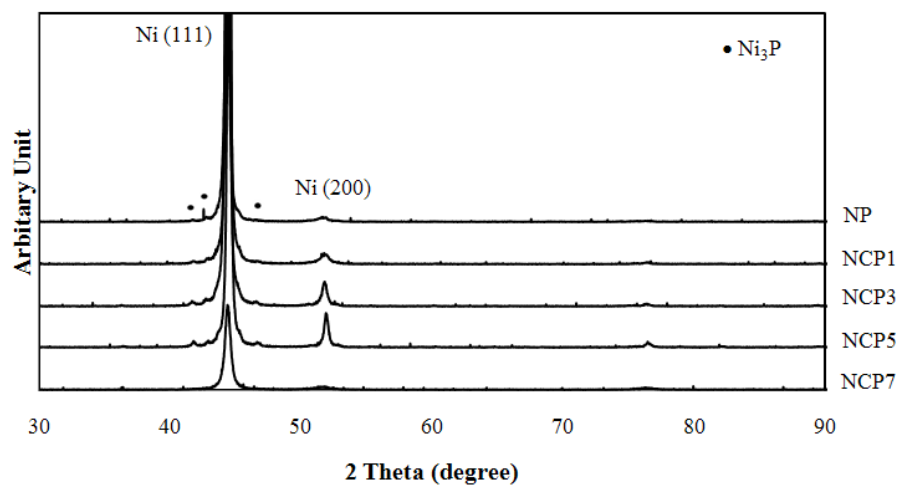


ภาพที่ 4.7 XRD pattern ของ NP, NCP1, NCP3, NCP5 และ NCP7 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 300°C

จาก XRD pattern แสดงให้เห็นว่ายังไม่มีการเปลี่ยนแปลงของเฟสหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเช่นเดียวกับที่ 200°C แต่ลักษณะของ XRD pattern มีค่า intensity ที่เพิ่มสูงขึ้นกว่า 200°C ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของขนาดเกรน

#### 4.3.3 ผลของกรรมวิธีทางความร้อนของชั้นเคลือบนิกเกิล-ฟอสฟอรัส และ นิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิ 400°C

จากการศึกษาชั้นเคลือบหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 400°C ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของเฟสดังแสดงในภาพที่ 4.8

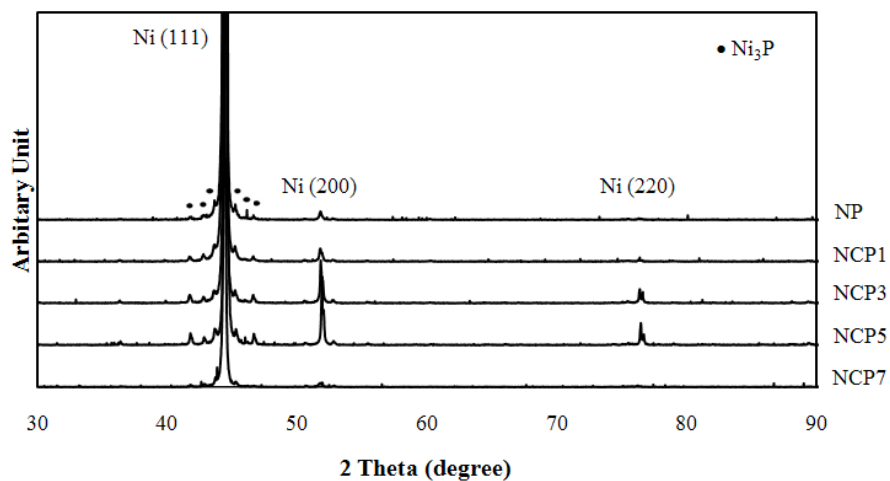


ภาพที่ 4.8 XRD pattern ของ NP, NCP1, NCP3, NCP5 และ NCP7 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่  $400^{\circ}\text{C}$

จาก XRD pattern พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟส โดยเกิดสารประกอบเชิงโลหะชนิด  $\text{Ni}_3\text{P}$  และลักษณะของ XRD pattern เปลี่ยนแปลงไป โดยมีค่า intensity ที่เพิ่มสูงขึ้นกว่า  $300^{\circ}\text{C}$  ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของขนาดเกรนที่มากขึ้น

#### 4.3.4 ผลของกรรมวิธีทางความร้อนของชั้นเคลือบนิกเกิล-ฟอสฟอรัส และ นิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิ $500^{\circ}\text{C}$

เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของเฟสที่เกิดขึ้นของชั้นเคลือบที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่  $500^{\circ}\text{C}$  จึงทำการตรวจสอบด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในภาพที่ 4.9



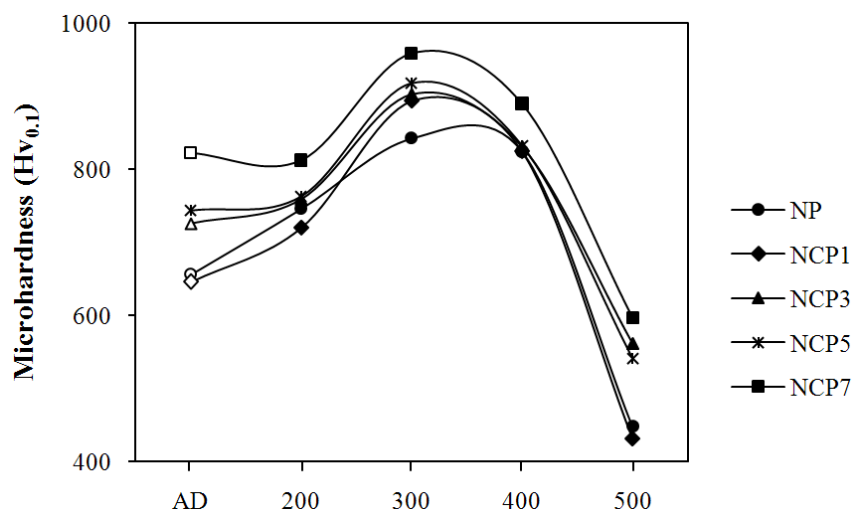
ภาพที่ 4.9 XRD pattern ของ NP, NCP1, NCP3, NCP5 และ NCP7 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่  $500^{\circ}\text{C}$

จาก XRD pattern พบว่าเกิดสารประกอบเชิงโลหะชนิด  $\text{Ni}_3\text{P}$  ปริมาณมากขึ้น และลักษณะของ XRD pattern เปลี่ยนแปลงไป โดยมีค่า intensity ที่เพิ่มสูงขึ้นกว่า  $400^{\circ}\text{C}$  ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของขนาดเกรนที่มากขึ้นกว่าเดิม

นอกจากนั้นยังเห็นได้ว่า เมื่อผ่านกรรมวิธีทางความร้อนพบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณโคบอลต์ในชั้นเคลือบทำให้ขนาดเกรนและโครงสร้างผลึกของวัสดุมีความเสถียรมากขึ้น [19, 20]

#### 4.4 ความแข็งของชั้นเคลือบนิกเกิล-ฟอสฟอรัส และนิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

เมื่อนำชั้นเคลือบไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่  $200^{\circ}\text{C}$ ,  $300^{\circ}\text{C}$ ,  $400^{\circ}\text{C}$  และ  $500^{\circ}\text{C}$  หลังจากนั้นนำมาตรวจสอบหาค่าความแข็งด้วยเครื่อง microhardness ซึ่งผลที่ได้จะแสดงในภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 ความแข็งของ NP, NCP1, NCP3, NCP5 และ NCP7 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 200°C, 300°C, 400°C และ 500°C

จากภาพที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าความแข็งของชั้นเคลือบมีความสัมพันธ์กับปริมาณโคบอลต์ และอุณหภูมิของกรรมวิธีทางความร้อน โดยที่ NCP7 ซึ่งเป็นชั้นเคลือบที่มีโคบอลต์มากที่สุด มีความแข็งสูงที่สุดในทุกอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิ 200°C และ 300°C ความแข็งที่เพิ่มขึ้นเนื่องจาก Grain relaxation [21, 22] ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับขอบเกรนที่ไม่เสถียร โดยเกิดระหว่างการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่ำ มีผลทำให้ critical shear stress มีค่าสูงขึ้น ซึ่งทำให้ขอบเกรนมีความแข็งแรงที่มากขึ้น ทนต่อการ slip ของ dislocation ได้มากขึ้น จึงส่งผลให้วัสดุแข็งแรงขึ้น และความแข็งสูงที่สุดเมื่อผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 300°C และหลังจากนั้นความแข็งจะเริ่มลดลงเนื่องจาก Grain growth ซึ่งหลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 500°C พบว่าชั้นเคลือบมีความแข็งที่น้อยที่สุด และน้อยกว่าชั้นเคลือบที่ไม่ได้ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

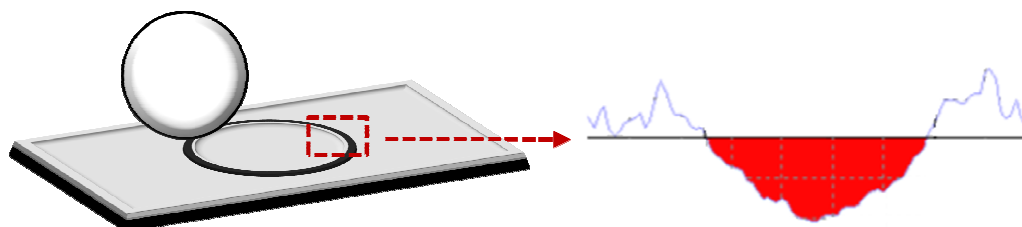
#### 4.5 ความต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบนิเกิล-ฟอสฟอรัส และนิเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส

ความต้านทานการสึกหรอเป็นสมบัติเด่นของชั้นเคลือบนิเกิล-ฟอสฟอรัส (ฟอสฟอรัส น้อย) ที่ชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า และเป็นสมบัติที่สำคัญในการใช้งานสำหรับชิ้นงานทางวิศวกรรม ซึ่งในส่วนของชิ้นงานที่นำมาทดสอบการสึกหรอจะเป็นชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 300°C

เนื่องจากมีความแข็งมากที่สุด โดยในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบการสึกหรอของชั้นเคลือบทั้งก่อน และ หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ดังนี้

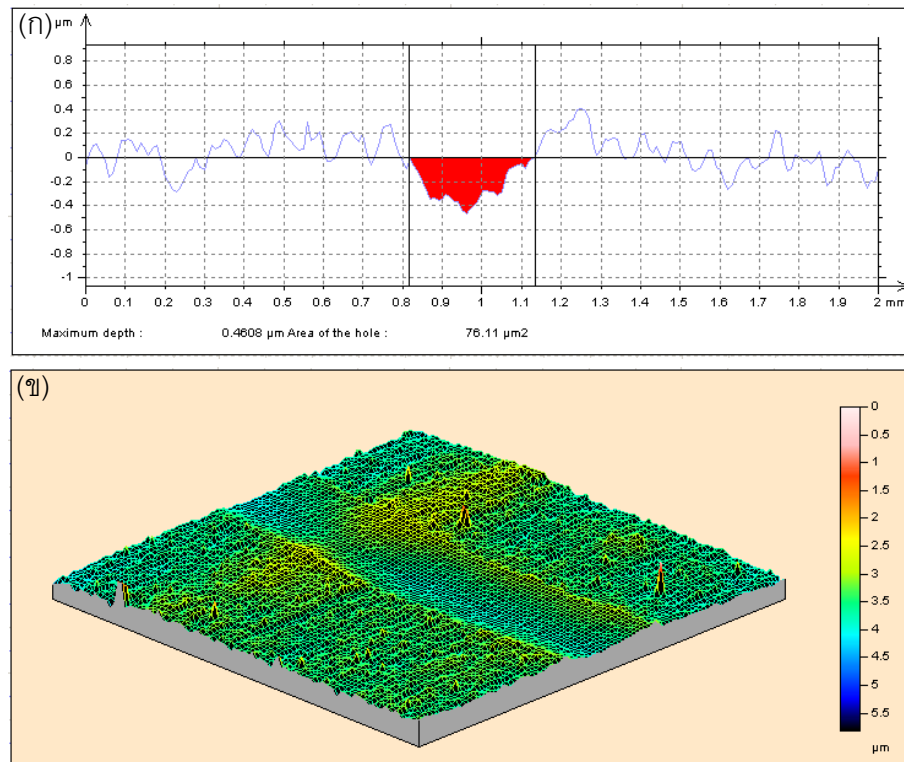
#### 4.5.1 การตรวจสอบความต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบ as-deposited

ชั้นเคลือบ as-deposited จะทดสอบความต้านทานการสึกหรอด้วย ball-on-disc และ วิเคราะห์พื้นผิวร่องที่สึกหรอด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ซึ่งแสดงรายละเอียด การศึกษา ดังต่อไปนี้

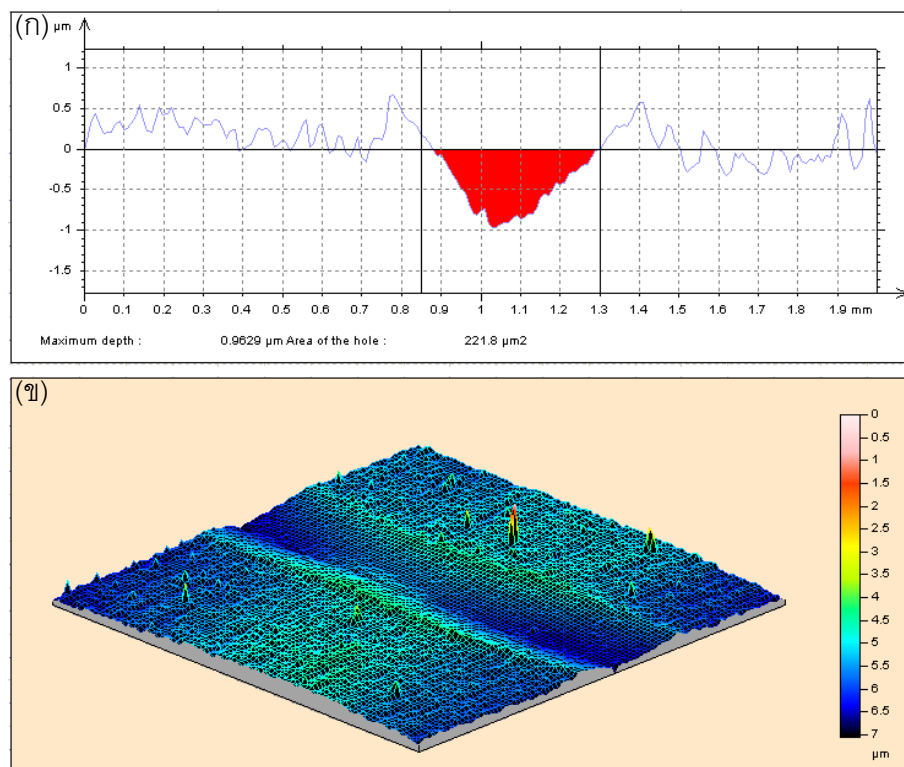


ภาพที่ 4.11 การคำนวณหาพื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ

พื้นที่ของการสึกหรอของชั้นเคลือบสามารถหาได้จากเครื่อง Profilometer และใช้โปรแกรม Taly scan Model#150 ในการคำนวณหาพื้นที่ ซึ่งผลการทดสอบจะแสดงภาพแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ดังภาพต่อไปนี้

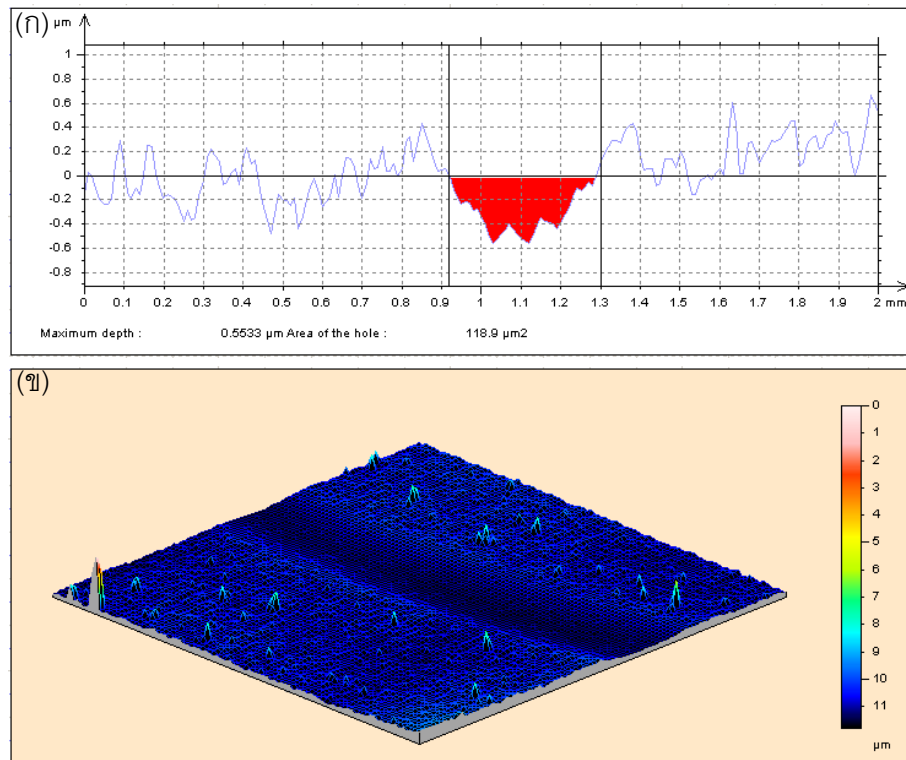


ภาพที่ 4.12 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ NP (ก) แบบ 2 มิติ และ (ข) แบบ 3 มิติ

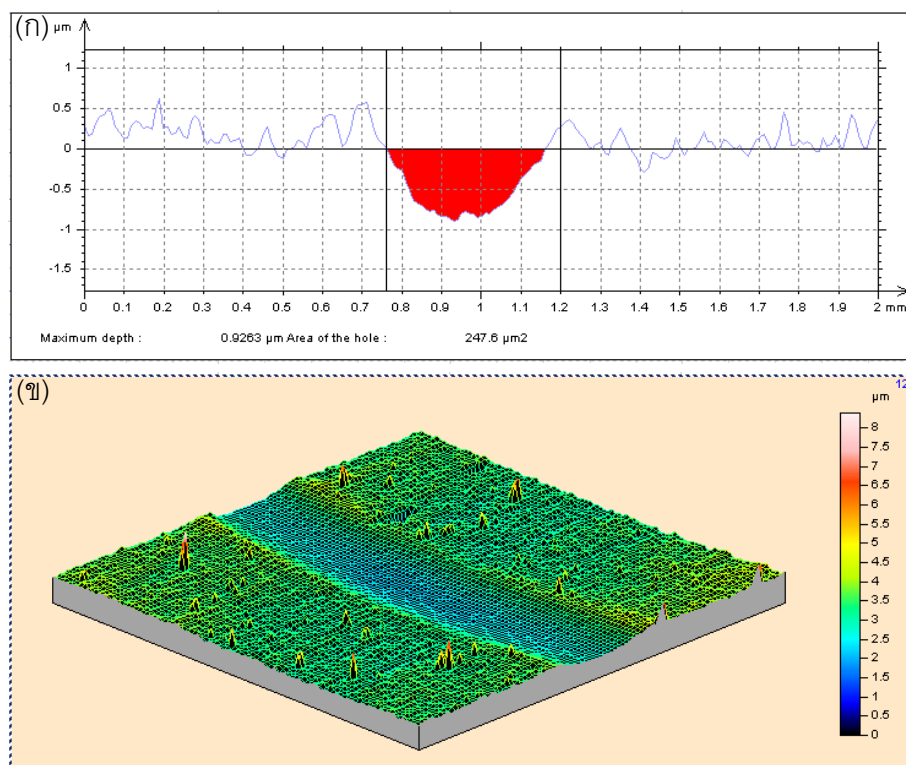


ภาพที่ 4.13 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ NCP1 (ก) แบบ 2 มิติ และ (ข) แบบ 3 มิติ

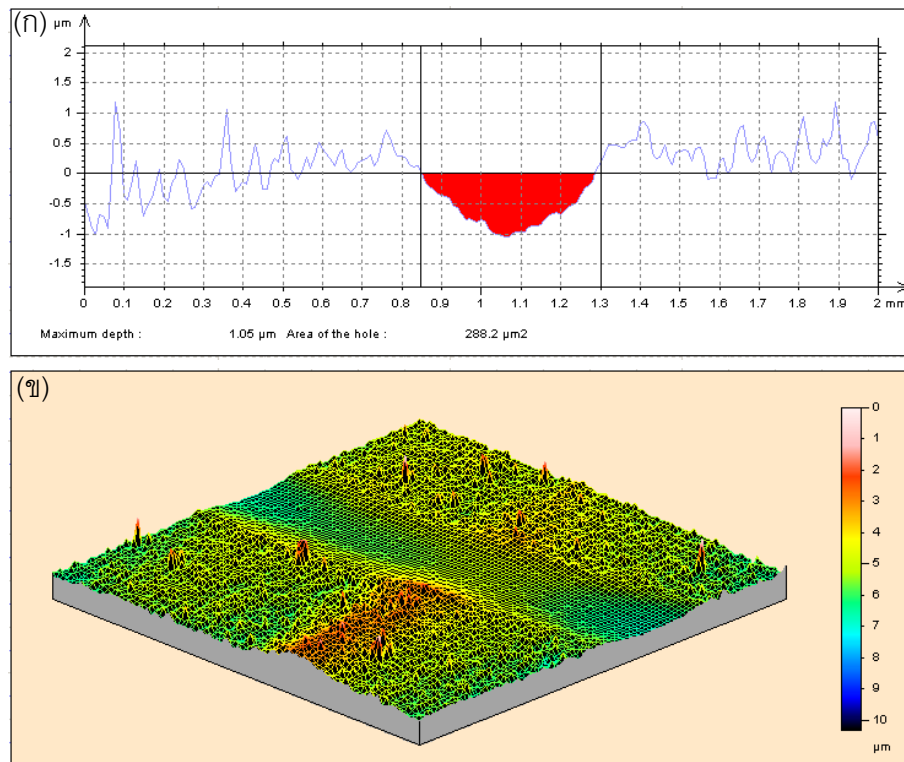




ภาพที่ 4.14 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ NCP3 (ก) แบบ 2 มิติ และ (ข) แบบ 3 มิติ



ภาพที่ 4.15 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ NCP5 (ก) แบบ 2 มิติ และ (ข) แบบ 3 มิติ

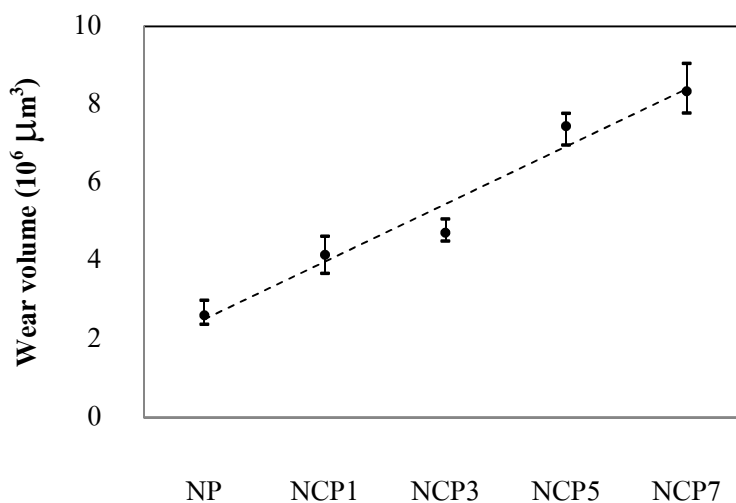


ภาพที่ 4.16 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ NCP7 (ก) แบบ 2 มิติ และ (ข) แบบ 3 มิติ

จากภาพแสดงชิ้นงานบริเวณพื้นที่การสึกหรอ และเมื่อนำมาคูณกับความยาวเส้นรอบวงที่ทำการทดสอบ จึงสามารถหาปริมาตรการสึกหรอได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.17

ตารางที่ 4.3 พื้นที่เฉลี่ยการสึกหรอและปริมาตรการสึกหรอของชั้นเคลือบ As-deposited

ชิ้นงาน	ความยาวเส้นรอบวง ( $10^3 \mu\text{m}$ )	พื้นที่เฉลี่ยการสึกหรอ ( $\mu\text{m}^2$ )	ปริมาตรการสึกหรอ ( $10^6 \mu\text{m}^3$ )
As-deposited			
NP	31.42	83.29	2.62
NCP1		132.57	4.17
NCP3		150.47	4.73
NCP5		237.00	7.45
NCP7		265.47	8.34

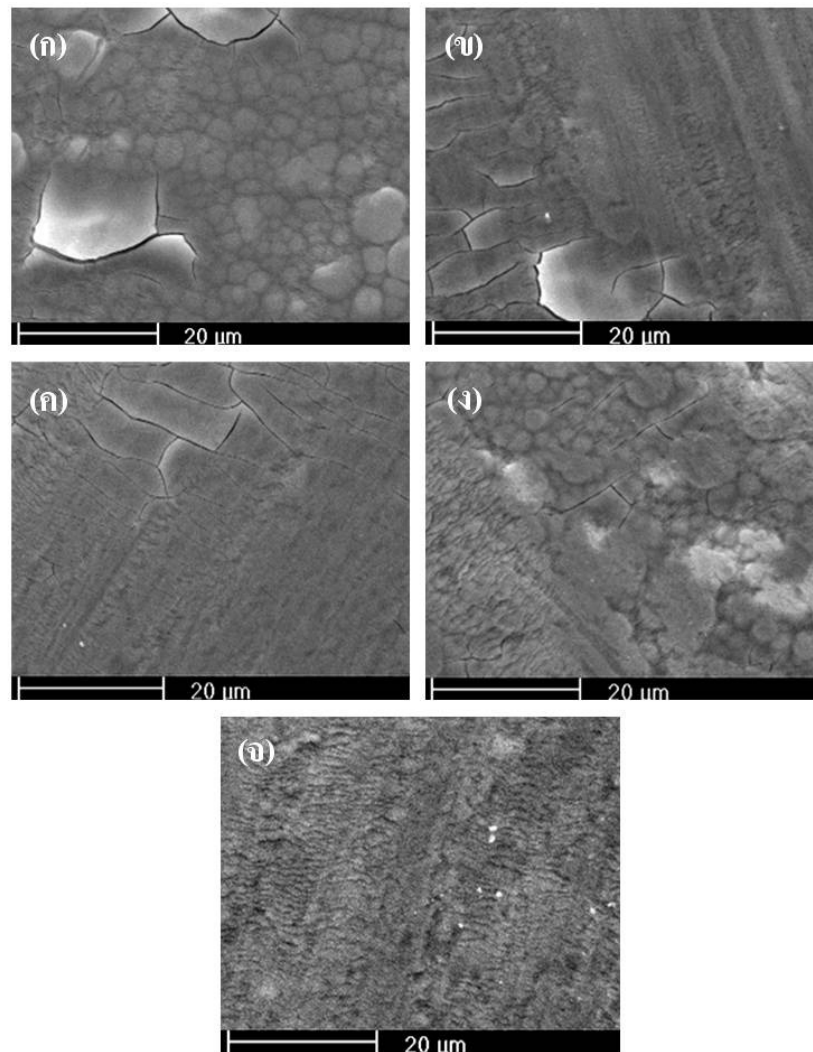


ภาพที่ 4.17 ปริมาตรการสึกหรอของชั้นเคลือบ As-deposited

ปริมาตรการสึกหรอของชั้นเคลือบที่มีปริมาณโคบอลต์สูงขึ้น กลับมีความต้านทานการสึกหรอที่น้อยลง โดย NCP7 เป็นชั้นเคลือบที่มีปริมาณโคบอลต์ในชั้นเคลือบมากที่สุด พบว่ามีปริมาตรการสึกหรอของชั้นเคลือบมากที่สุด ส่วนชั้นเคลือบนิกเกิล-ฟอสฟอรัสมีกการสึกหรอที่น้อยที่สุด ดังที่แสดงในภาพที่ 4.17

เนื่องจากชั้นเคลือบที่ทำการทดสอบเมื่อมีโคบอลต์มากขึ้นพบว่าจะมีความแข็งที่สูงขึ้น แต่มีความต้านทานการสึกหรอที่ลดลง ดังนั้นจึงต้องทำการตรวจสอบชั้นเคลือบเพื่อความเข้าใจถึงสมบัติความต้านทานการสึกหรอ ดังนี้

การตรวจสอบพื้นผิวร่องของชั้นเคลือบที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ดังแสดงในภาพที่ 4.18



ภาพที่ 4.18 พื้นผิวร่องของชั้นเคลือบ (ก) NP, (ข) NCP1, (ค) NCP3, (ง) NCP5, (จ) NCP7 ที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอ

จากภาพแสดงให้เห็นลักษณะพื้นผิวร่องการสึกหรอของชั้นเคลือบที่มีปริมาณโคบอลต์ที่แตกต่างกัน โดยที่ภาพ 4.18 (ก) เป็นชั้นเคลือบนิกเกิลฟอสฟอรัส พบเพียงแค່รอยแตกและยังแสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบสึกหรอไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งมีความแตกต่างกับชั้นเคลือบที่มีโคบอลต์อย่างชัดเจน โดยสามารถสังเกตเห็นความขรุขระของร่องการสึกหรอที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อมีปริมาณโคบอลต์สูง ดังภาพที่ 4.18 (จ) โดยกล่าวได้ว่าโคบอลต์ส่งผลให้ลักษณะการสึกหรอเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะอธิบายถึงสาเหตุดังกล่าวในส่วนถัดไป

#### 4.5.2 การตรวจสอบความต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

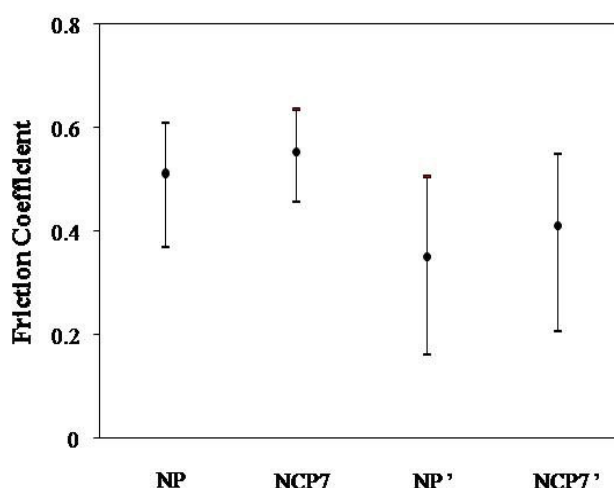
ในงานวิจัยนี้เลือกชั้นเคลือบที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 300 °C เพื่อนำมาทำการศึกษาความต้านทานการสึกหรอ เนื่องจากมีสมบัติด้านความแข็งที่ดีที่สุด อันเป็นปัจจัยหนึ่ง ที่ส่งเสริมให้วัสดุมีความต้านทานการสึกหรอที่สูง โดยมีรายละเอียด ดังนี้

##### 4.5.2.1 การทดสอบความต้านทานการสึกหรอด้วย ball-on-disc

งานวิจัยนี้ได้ทดสอบความต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบด้วยวิธี ball-on-disc โดยทำการศึกษาชั้นเคลือบ NP และ NCP7 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 300 °C ซึ่งมีปริมาณโคบอลต์ และสมบัติทางกล เช่น ความแข็ง และลักษณะของการสึกหรอที่แตกต่างกัน อย่างชัดเจน เพื่ออธิบายอิทธิพลของโคบอลต์ที่ส่งผลต่อชั้นเคลือบ โดยมีรายละเอียดของผลการทดลอง ดังนี้

##### 1) ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของชั้นเคลือบ

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายภายหลังการทดสอบด้วย ball-on-disc สามารถหาได้จากเครื่องทดสอบความต้านทานการสึกหรอ Model TE79 และใช้โปรแกรม PLINT ตรวจสอบ โดยที่ผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 4.18



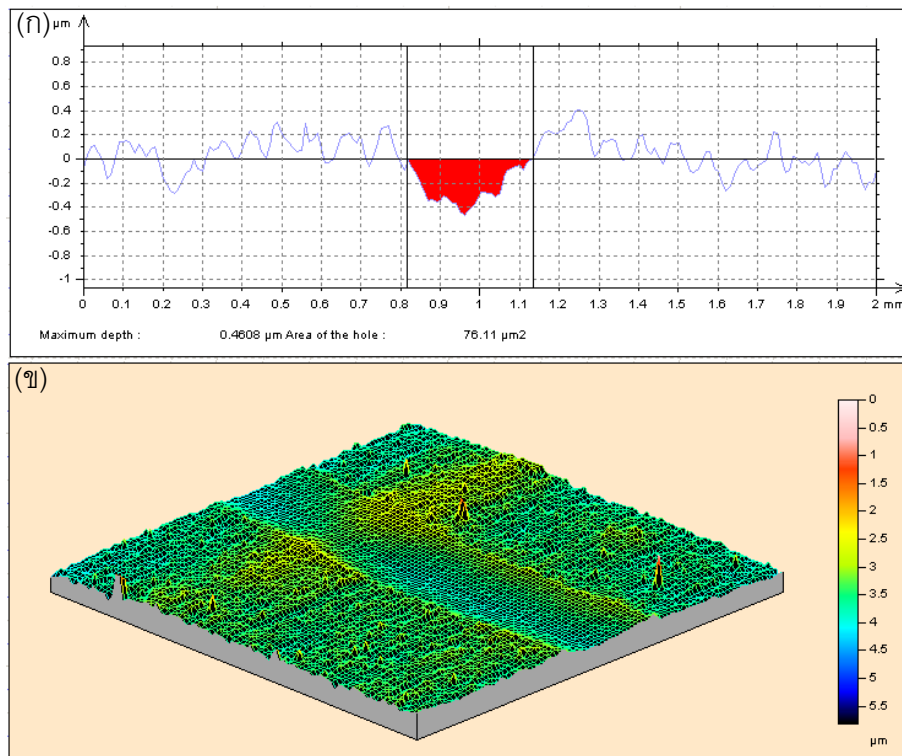
ภาพที่ 4.19 สัมประสิทธิ์ความเสียหายของชั้นเคลือบ as-deposited NP, NCP7, heat treatment NP' และ NCP7'

จากภาพแสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชั้นเคลือบนิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส มีค่าสูงกว่าชั้นเคลือบนิกเกิล-ฟอสฟอรัส ทั้ง as-deposited และหลังจากกรรมวิธีทางความร้อน โดยพบว่ากรรมวิธีทางความร้อนมีผลทำให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชั้นเคลือบลดลง เนื่องจากหลังจากกรรมวิธีทางความร้อนจะเกิดการ oxidation บริเวณผิวของชั้นเคลือบทำให้เกิด oxide ชั้นที่ผิว ซึ่งจะทำหน้าที่เหมือน lubricant ขณะที่ทดสอบการสึกหรอด้วย ball-on-disc

## 2) การตรวจสอบปริมาตรการสึกหรอของชั้นเคลือบ

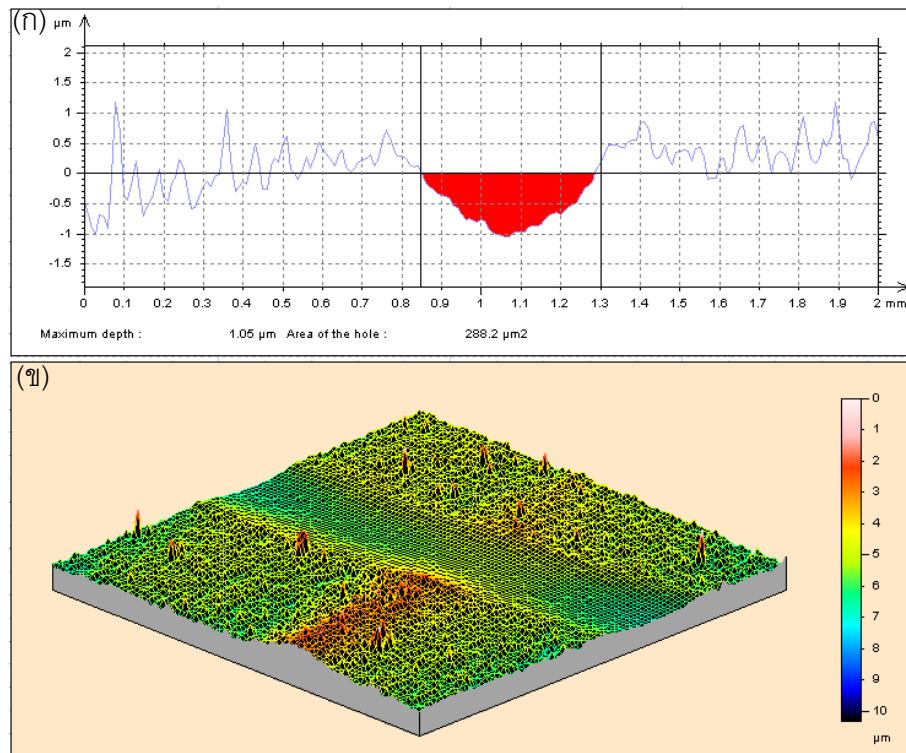
การตรวจสอบหาปริมาตรการสึกหรอของชั้นเคลือบภายหลังทดสอบด้วย ball-on-disc สามารถคำนวณหาได้จากพื้นที่เฉลี่ยของร่องที่สึกหรอ (Wear track) คูณกับความยาวเส้นรอบวงของการเคลื่อนที่ของบอลขณะทำการทดสอบการสึกหรอ เช่นเดียวกับการศึกษาชั้นเคลือบ as-deposited

โดยใช้เครื่อง Profilometer ในการหาพื้นที่ของการสึกหรอของชั้นเคลือบ และใช้โปรแกรม Taly scan Model#150 ในการคำนวณหาพื้นที่ ซึ่งแสดงผลการทดลองเป็นภาพแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ดังต่อไปนี้



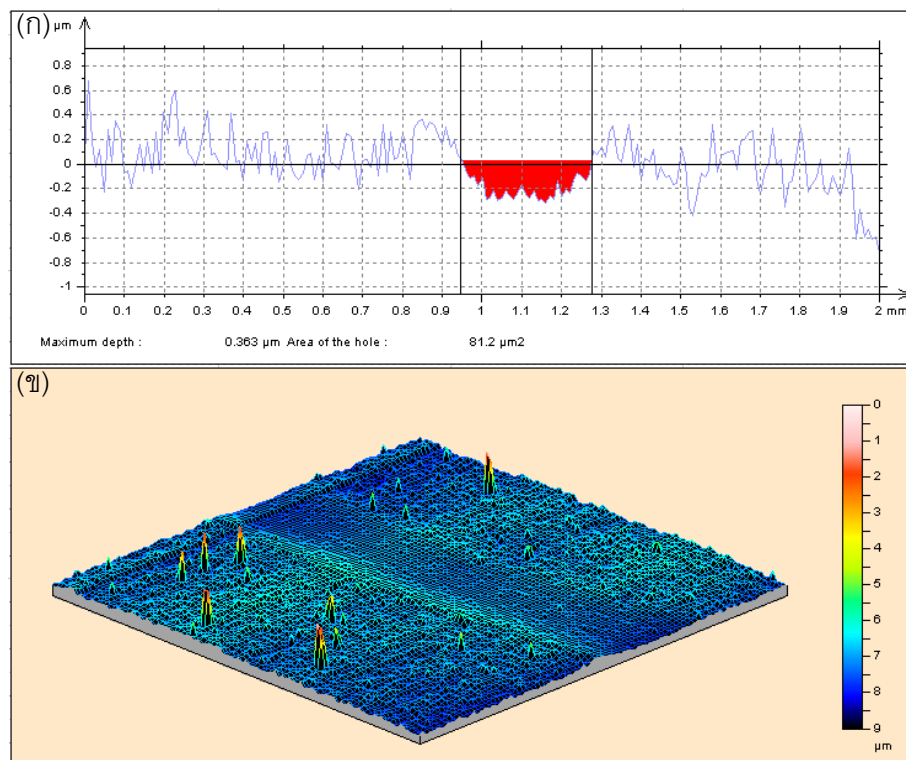
ภาพที่ 4.20 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ as-deposited NP

(ก) แบบ 2 มิติ และ (ข) แบบ 3 มิติ



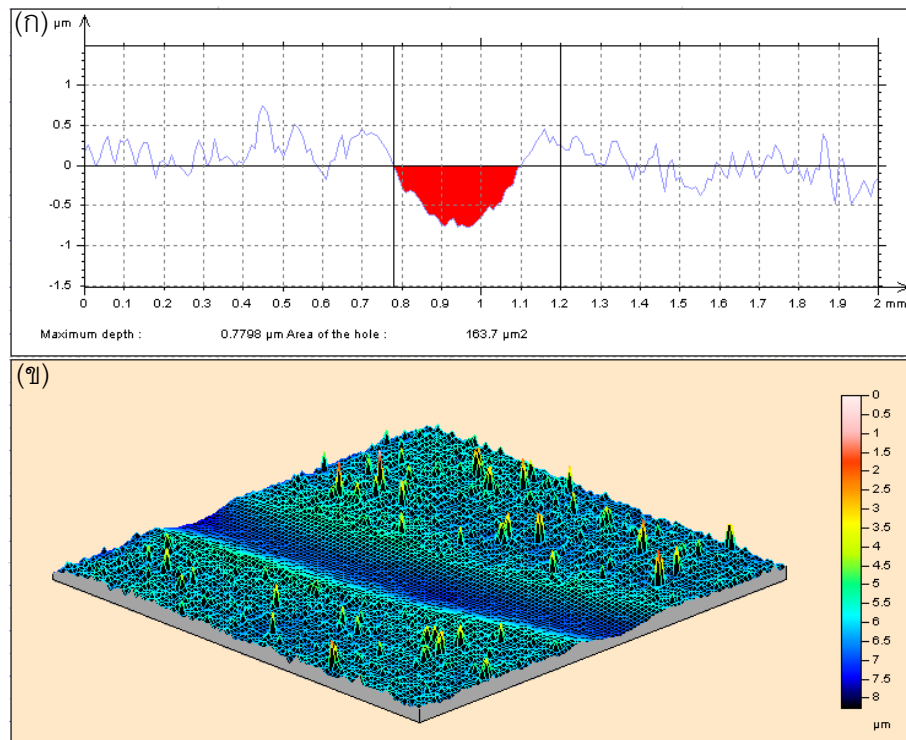
ภาพที่ 4.21 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ as-deposited NCP7

(ก) แบบ 2 มิติ และ (ข) แบบ 3 มิติ



ภาพที่ 4.22 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ Heat treatment NP

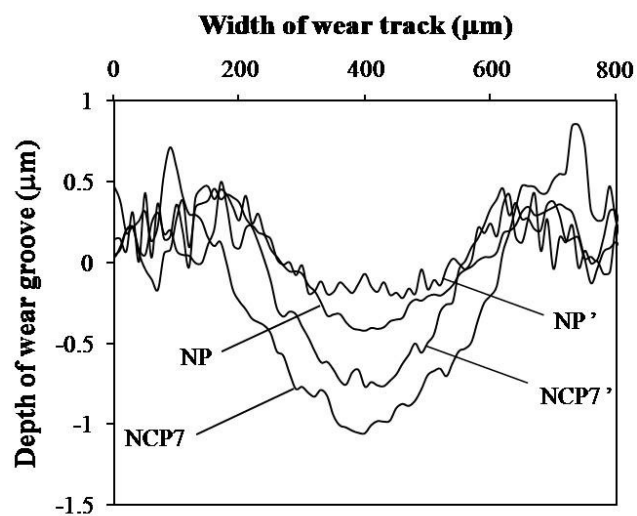
(ก) แบบ 2 มิติ และ (ข) แบบ 3 มิติ



ภาพที่ 4.23 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ Heat treatment NCP7

(ก) แบบ 2 มิติ และ (ข) แบบ 3 มิติ

จากภาพแสดงขึ้นงานบริเวณพื้นที่การสึกหรอ และเมื่อนำมาคูณกับความยาวเส้นรอบวงที่ทำการทดสอบ จึงสามารถหาปริมาตรการสึกหรอได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.24 และตารางที่ 4.4



ภาพที่ 4.24 แสดงการสึกหรอของชั้นเคลือบที่ผ่านการทดสอบ ball-on-disc



ตารางที่ 4.4 พื้นที่เฉลี่ยการสึกหรอและปริมาตรการสึกหรอของชั้นเคลือบ

ชิ้นงาน		ความยาวเส้นรอบวง ( $10^3 \mu\text{m}$ )	พื้นที่เฉลี่ยการสึกหรอ ( $\mu\text{m}^2$ )	ปริมาตรการสึกหรอ ( $10^6 \mu\text{m}^3$ )
As- deposited	NP	31.42	83.29	2.62
	NCP7		248.40	7.80
Heat treatment	NP '		60.10	1.89
	NCP7 '		164.90	5.18

จากการคำนวณปริมาตรการสึกหรอ ในตารางที่ 4.4 พบว่าชั้นเคลือบที่มีโคบอลต์สูงชัน จะมีความต้านทานการสึกหรอน้อยลง โดย NCP7 เป็นชั้นเคลือบที่มีปริมาณโคบอลต์ในชั้นเคลือบมาก และมีความแข็งที่สูง กลับพบว่าปริมาตรการสึกหรอของชั้นเคลือบที่มาก ส่วนชั้นเคลือบนิกเกิล-ฟอสฟอรัสที่มีความแข็งน้อยกว่า มีการสึกหรอน้อย ซึ่งไม่เป็นไปตามทฤษฎีของ Archard [23] ที่อธิบายความต้านทานการสึกหรอแบบ Abrasive wear โดยกล่าวว่าวัสดุที่มีความแข็งสูงจะมีความต้านทานการสึกหรอที่สูงด้วย

$$\text{Archard's equation} \quad V = K \cdot L \cdot P / H \quad (\text{สมการที่ 4.1})$$

$V$  = Wear volume

$K$  = Wear coefficient

$L$  = Sliding distance

$P$  = Applied load

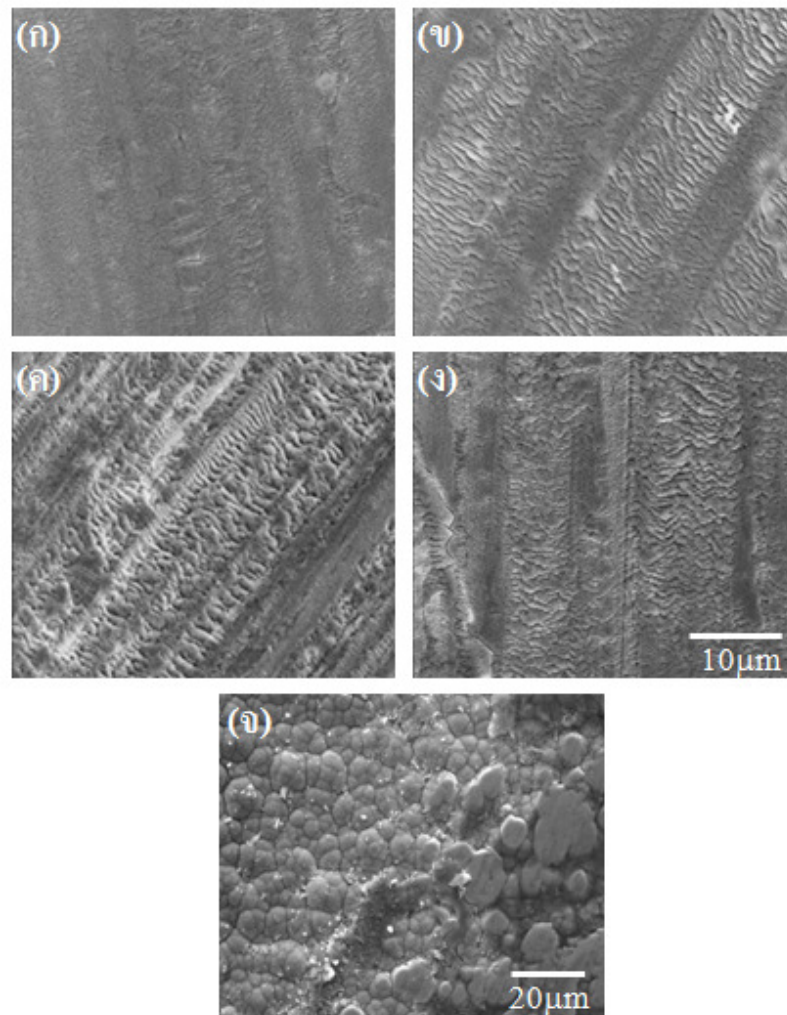
$H$  = Hardness

เมื่อเปรียบเทียบการสึกหรอของชั้นเคลือบ as-deposited และชั้นเคลือบที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน พบว่ากรรมวิธีทางความร้อนช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการสึกหรอให้สูงชัน ดังที่แสดงในภาพที่ 4.24

### 3) การตรวจสอบการสึกหรอของชั้นเคลือบ

เนื่องจากชั้นเคลือบที่ทำการทดสอบเมื่อมีโคบอลต์มากขึ้นพบว่าจะมีความแข็งที่สูงขึ้น แต่มีความต้านทานการสึกหรอที่ลดลง ดังนั้นจึงต้องทำการตรวจสอบชั้นเคลือบเพื่อความเข้าใจถึงสมบัติความต้านทานการสึกหรอ ดังนี้

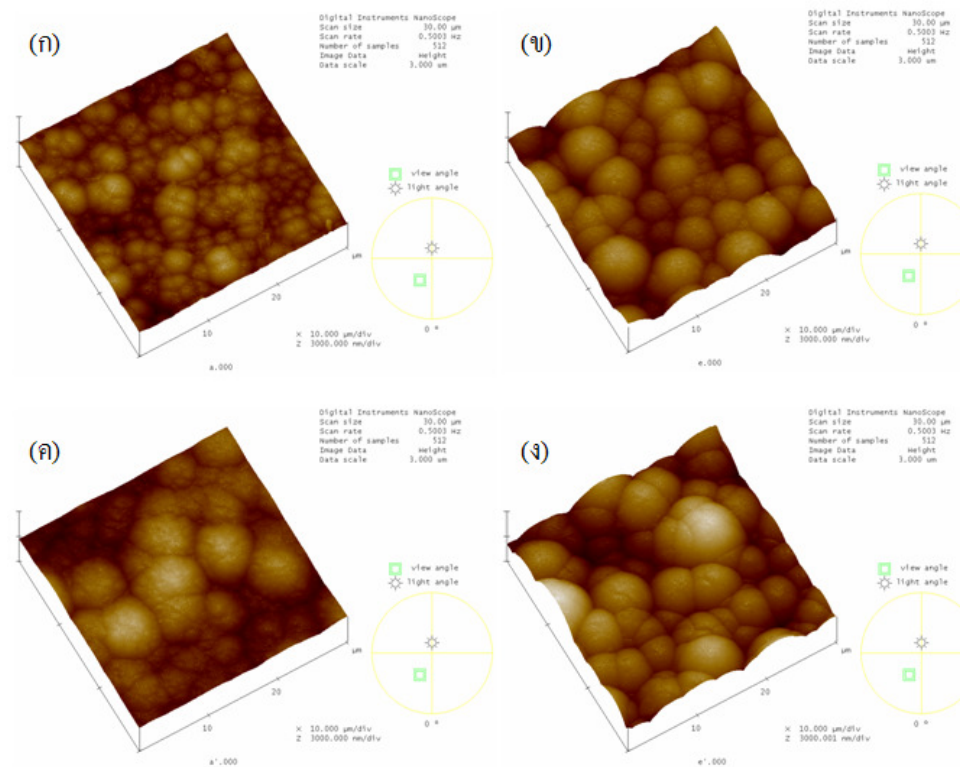
3.1) การตรวจสอบพื้นผิวร่องของชั้นเคลือบที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ดังแสดงในภาพที่ 4.25



ภาพที่ 4.25 พื้นผิวร่องการสึกหรอของชั้นเคลือบ as-deposited (ก) NP, (ข) NCP7, heat treatment (ค) NP, (ง) NCP7 และ (จ) การแตกหักแบบเปราะของ NCP7

จากภาพแสดงให้เห็นความแตกต่างของพื้นผิวชั้นเคลือบที่มีโคบอลต์ต่างกัน ซึ่งภาพที่ 4.25 (ก) เป็นชั้นเคลือบที่ไม่มีโคบอลต์และมีปริมาตรการสึกหรอที่น้อยที่สุด พบว่าสามารถเห็นบริเวณร่องการสึกหรอของชั้นเคลือบที่ค่อนข้างเรียบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพื้นผิวถูกครูดออกไปเพียงเล็กน้อย โดยการสึกหรอเกิดจากกลไกการสึกหรอแบบ Abrasive wear เป็นหลัก ส่วนภาพที่ 4.25 (ข) พบว่าเมื่อชั้นเคลือบมีโคบอลต์มากขึ้น จะสังเกตเห็นความขรุขระของผิวภายหลังทดสอบการสึกหรอมากขึ้น เนื่องจากการที่มีโคบอลต์ในชั้นเคลือบสูงขึ้นนอกจากความแข็งที่สูงขึ้นแล้ว ยังพบว่าความหยาบผิวก็เพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน (ภาพที่ 4.26) ดังนั้นเมื่อทดสอบการสึกหรอ NCP7 จะมีอัตราการสึกหรอที่สูงกว่า เพราะมี stress บริเวณ asperities สูง ทำให้มีโอกาสที่จะเกิดการยึดติดระหว่างชั้นเคลือบกับ ball มากขึ้น และทำให้เกิดการสึกหรอแบบยึดติด (adhesive wear) ได้มากขึ้น ซึ่งปรากฏลักษณะพื้นผิวขรุขระ (lamellar structure) อยู่ภายในร่อง wear track ภายหลังการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 4.25 (ข) นอกจากนั้นยังพบลักษณะการแตกหักแบบเปราะ (Brittle fracture) ด้วยเหตุนี้ภายหลังทดสอบการสึกหรอจึงพบว่าถึงแม้ชั้นเคลือบที่มีโคบอลต์จะมีความแข็งที่สูง แต่มีความต้านทานการสึกหรอที่ต่ำกว่าชั้นเคลือบนิเกิล-ฟอสฟอรัส

ชั้นเคลือบที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ภาพที่ 4.25 (ค), (ง) พบว่าชั้นเคลือบทั้งคู่มีการสึกหรอแบบ adhesive wear เป็นหลัก แต่ชั้นเคลือบที่มีโคบอลต์ยังคงมีการสึกหรอที่มากกว่า เนื่องจากมีพฤติกรรมเกิดการแตกหักแบบเปราะ แต่ถึงอย่างไรก็ตามพบว่ากรรมวิธีทางความร้อนสามารถทำให้ชั้นเคลือบมีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอที่ดีขึ้นได้ เนื่องจากชั้นเคลือบที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ โดยการเกิดออกไซด์บริเวณผิวทำหน้าที่เหมือนสารหล่อลื่นขณะทดสอบการสึกหรอ ซึ่งสามารถพบพฤติกรรมลักษณะนี้ได้ในงานวิจัยอื่นเช่นกัน [24-26]



ภาพที่ 4.26 การทดสอบความหยาบผิวด้วยเครื่อง Atomic Force Microscopy (AFM)

เมื่อพิจารณาชั้นเคลือบ as-deposited จากภาพที่ 4.26 a) และ d) แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีปริมาณโคบอลต์ในชั้นเคลือบมากขึ้นจะทำให้โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนแปลงไป โดยมี cluster ที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้ชั้นเคลือบมีความหยาบผิวเพิ่มสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้เมื่อผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ภาพที่ 4.26 c) และ d) พบว่าชั้นเคลือบทั้ง นิกเกิล-ฟอสฟอรัส และนิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส มีขนาดของโครงสร้างจุลภาคที่ใหญ่ขึ้น ดังนั้นจะมีความหยาบผิวที่สูงกว่าชั้นเคลือบ as-deposited ด้วย โดยชั้นเคลือบนิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมีความหยาบผิวสูงที่สุด (ตารางที่ 4.5)

ตารางที่ 4.5 ค่าความหยาบผิว ปริมาตรการสึกหรอ และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชั้นเคลือบ

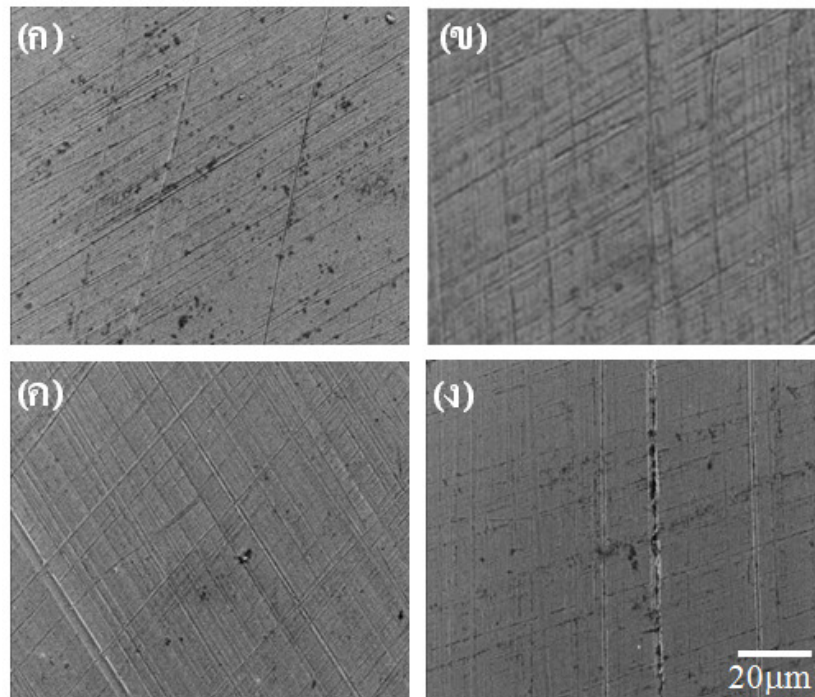
Specimens	Surface	Taber Abraser wear	Ball-on-disc	Coefficient of friction ( $\mu$ )
	roughness (Ra, nm.)	Avg. volume loss ( $10^9 \mu\text{m}^3$ )	Avg. wear volume ( $10^6 \mu\text{m}^3$ )	
NP	85.21	2.04	2.62	0.52
NCP7	260.61	1.59	7.80	0.55
NP '	136.15	1.32	1.89	0.35
NCP7 '	382.79	1.08	5.18	0.41

ค่าความหยาบผิว ความต้านทานการสึกหรอทั้ง Taber Abraser wear และ ball-on-disc รวมทั้งสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชั้นเคลือบที่ผ่านการทดสอบทั้งหมด ได้สรุปในตารางที่ 4.5

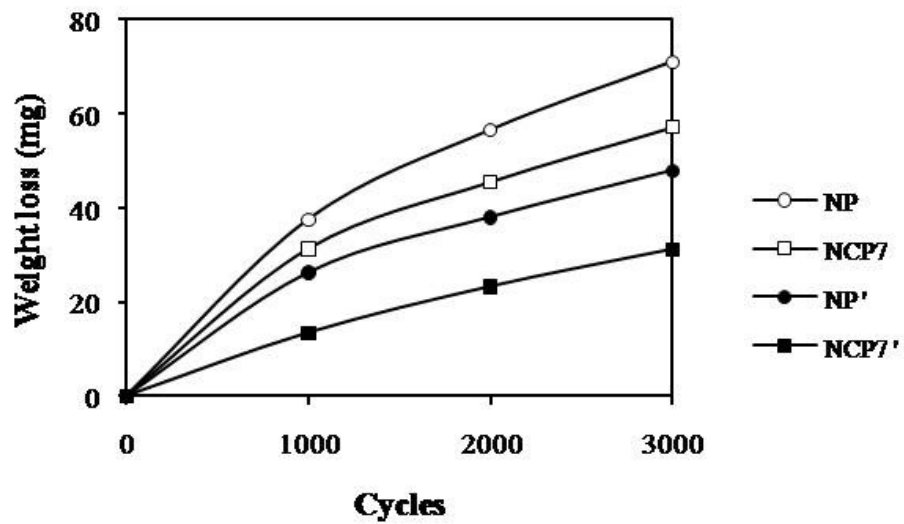
#### 4.5.2.2 การทดสอบความต้านทานการสึกหรอด้วย Taber Abraser wear

การทดสอบการสึกหรอด้วย Taber Abraser wear เป็นการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบ Abrasive wear เนื่องจากการทดสอบด้วย ball-on-disc จะเกิดกลไกการสึกหรอทั้ง Abrasive wear และ Adhesive wear ทำให้ชั้นเคลือบที่ทดสอบนั้นถึงแม้จะมีความแข็งที่สูง แต่กลับมีความต้านทานการสึกหรอที่ต่ำกว่าชั้นเคลือบที่มีความแข็งที่น้อยกว่า

1) การตรวจสอบพื้นผิวร่องของชั้นเคลือบที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ดังแสดงในภาพที่ 4.27 แสดงให้เห็นชั้นเคลือบที่ผ่านการทดสอบ Taber Abraser wear พบว่าการสึกหรอเป็นแบบ Abrasive wear เพียงอย่างเดียว ซึ่งมีลักษณะของการสึกหรอที่แตกต่างกับ ball-on disc อย่างชัดเจน



ภาพที่ 4.27 พื้นผิวร่องของชั้นเคลือบที่ผ่านการทดสอบ Taber Abraser wear ชั้นเคลือบ as-deposited NP (ก), NCP7 (ข), heat treatment NP (ค) และ NCP7 (ง)



ภาพที่ 4.28 ผลการทดสอบ Taber wear ของชั้นเคลือบ as-deposited NP, NCP7 และ heat treatment NP', NCP7'

จากภาพที่ 4.28 แสดงความต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบ as-deposited และ heat treatment ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในช่วงแรกของการทดสอบทั้งชั้นเคลือบนิกเกิล-ฟอสฟอรัส และ นิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส จะมีอัตราการสึกหรอในช่วง 1000 รอบแรกที่สูงเพราะชั้นเคลือบมีความหยาบผิวที่สูงอยู่ ภายหลังจากนั้นพบว่าชั้นเคลือบทั้งคู่ มีอัตราการสึกหรอที่น้อยลง เนื่องจากวัสดุมีความหยาบผิวที่น้อยลง และเมื่อผิวถูกครูดออกไปทำให้ที่ผิวเกิด work hardening จึงมีความแข็งที่สูงขึ้น ความต้านทานการสึกหรอจึงเพิ่มมากขึ้น

เมื่อพิจารณาความต้านทานการสึกหรอพบว่าชั้นเคลือบนิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส มีความต้านทานการสึกหรอที่สูงกว่าชั้นเคลือบนิกเกิล-ฟอสฟอรัส ทั้ง as-deposited และ heat treatment นอกจากนั้นการผ่านกรรมวิธีทางความร้อนยังพบว่าทำให้ชั้นเคลือบทั้ง นิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส และนิกเกิล-ฟอสฟอรัส มีความต้านทานการสึกหรอที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตาม Archard's equation ดังแสดงในสมการที่ 4.1 และคำนวณค่าคงที่ของการสึกหรอ (K) พบว่าชั้นเคลือบนิกเกิล-ฟอสฟอรัส มีค่า  $1.7 \times 10^{-3}$  และชั้นเคลือบนิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัส มีค่า  $1.6 \times 10^{-3}$

#### 4.6 การผลิตหินเจียด้วยวิธีชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

การผลิตหินเจียด้วยวิธีนี้จะใช้วัสดุพื้นที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากเหตุผลทางด้านความสามารถในการนำวัสดุพื้นกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถผลิตหินเจียด้วยวิธีการชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้าได้ โดยใช้การชุบนิกเกิลไฮดรอกไซด์เป็นชั้นรองพื้น

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโคบอลต์ ที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกล ได้แก่ ความแข็งและความต้านการสึกหรอของชั้นเคลือบนิเกิล-ฟอสฟอรัสที่ชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า นอกจากนั้นยังศึกษาผลของกรรมวิธีทางความร้อนในช่วง 200-500°C ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้าพบว่า อัตราส่วนจำนวนโมลของ  $\text{CoSO}_4 / (\text{CoSO}_4 + \text{NiSO}_4)$  ที่มากขึ้น จะส่งผลให้ชั้นเคลือบมีปริมาณโคบอลต์สูงขึ้น ปริมาณนิเกิลลดลง ส่วนฟอสฟอรัสมีปริมาณเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากสารละลายมีปริมาณ  $\text{Co}^{2+}$  มากขึ้น และในเวลาเดียวกันก็มี  $\text{Ni}^{2+}$  ในปริมาณที่ลดลง ส่วนฟอสฟอรัสมีปริมาณเท่าเดิม นอกจากนั้นปริมาณโคบอลต์ที่สูงขึ้นยังพบว่าส่งผลให้ชั้นเคลือบมีความแข็งที่สูงขึ้น

2. กรรมวิธีทางความร้อนส่งผลต่อชั้นเคลือบ ดังนี้

2.1 กรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 200-300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ส่งผลให้ชั้นเคลือบมีความแข็งสูงขึ้นจากปรากฏการณ์ grain relaxation และเริ่มเกิดสารประกอบเชิงโลหะชนิด  $\text{Ni}_3\text{P}$  ตั้งแต่อุณหภูมิ 400°C แต่ไม่ส่งผลให้ชั้นเคลือบมีความแข็งที่สูงขึ้น กลับพบว่าชั้นเคลือบเริ่มมีความแข็งที่ต่ำลงเนื่องจากการโตขึ้นของขนาดเกรน

2.2 กรรมวิธีทางความร้อนส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค โดยทำให้ cluster มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งส่งผลต่อค่าความหยาบผิวที่สูงขึ้นด้วย

3. ปริมาณโคบอลต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความต้านทานการสึกหรอ ดังนี้

3.1 การทดสอบ ball-on-disc พบว่าเกิดการสึกหรอแบบ abrasive และ adhesive wear ซึ่งปริมาณโคบอลต์ที่เพิ่มขึ้นทำให้กลไกการสึกหรอของชั้นเคลือบเป็นแบบ adhesive wear มากขึ้น นอกจากนั้นยังส่งผลให้ชั้นเคลือบมีความเปราะมากขึ้นด้วย



3.2 การทดสอบ Taber Abraser wear เป็นการทดสอบการสึกหรอแบบ abrasive wear พบว่าชั้นเคลือบที่มีปริมาณโคบอลต์เพิ่มขึ้น จะมีความต้านทานการสึกหรอที่สูงขึ้นด้วย

4. จากงานวิจัยนี้ทำให้ทราบว่ากรรมวิธีทางความร้อนที่  $300^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้ชั้นเคลือบมีความแข็งที่สูงขึ้น และการนำชั้นเคลือบที่มีปริมาณโคบอลต์สูงไปใช้ในงานต้านทานการสึกหรอต้องพิจารณาถึงรูปแบบของการสึกหรอที่เกิดขึ้นด้วย โดยชั้นเคลือบที่มีโคบอลต์นี้จะมี ความต้านทานการสึกหรอแบบ abrasive wear ได้ดี

5. งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าสามารถผลิตหินเจียด้วยวิธีการชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้าได้ และชั้นเคลือบนิกเกิล-โคบอลต์-ฟอสฟอรัสที่ทำการศึกษานั้นช่วยเพิ่มความต้านทานการสึกหรอให้ดีขึ้นได้

### ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักในการทดสอบการสึกหรอ และเพิ่มระยะทางทดสอบให้มากขึ้น เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการสึกหรอได้ดียิ่งขึ้น

2. ควรศึกษากรรมวิธีทางความร้อนให้มีช่วงของอุณหภูมิที่ละเอียดมากขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มจะทำให้ได้ชั้นเคลือบที่มีความแข็งที่สูงขึ้น

3. ควรศึกษาการยึดติดของชั้นเคลือบ เพราะเป็นสมบัติอีกประการที่สำคัญเมื่อนำชั้นเคลือบไปใช้งาน

## รายการอ้างอิง

- [1] K.G. Keong, W. Sha, and S. Malinov. Hardness evolution of electroless nickel-phosphorus deposits with thermal processing. Surface and Coatings Technology 168 (2003) : 263-274.
- [2] I. Apachitei, F.D. Tichelaar, J. Duszczyk, and L. Katgerman. The effect of heat treatment on the structure and abrasive wear resistance of autocatalytic NiP and NiP-SiC coatings. Surface and Coatings Technology 149 (2002) : 263-278.
- [3] I.H.M. Aly, M.M. Younan, and M.T. Nageeb. Autocatalytic (Electroless) deposition of ternary Nickel-Cobalt-Phosphorus alloy. Metal finishing 101 (2003) : 37-42
- [4] M. Palaniappa, and S.K. Seshadri. Friction and wear behavior of electroless Ni-P and Ni-W-P alloy coatings. Wear 265 (2008) : 735-740.
- [5] S.L. Wang. Studies of electroless plating of Ni-Fe-P alloys and the influences of some deposition parameters on the properties of the deposits. Surface and Coatings Technology 186 (2004) : 372-376.
- [6] มนต์ สติรจินดา. เหล็กกล้า. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [7] W.C. Leslie. The physical metallurgy of steels. United State of America : Hemisphere publishing corporation, 1981.
- [8] มนต์ สติรจินดา. โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

- [9] อนันต์ ทองมอญ. ชุบโลหะด้วยไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร : สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสุนน, 2544.
- [10] W. Riedel. Electroless nickel plating. Great Britain: Finishing publications Ltd, 1991.
- [11] W. Sha, X. Wu, and W. Sarililah. Scanning electron microscopy study of microstructural evolution of electroless nickel-phosphorus deposits with heat treatment. Materials science and engineering B 168 (2010) : 95-99.
- [12] J.T.W. Jappes, B.Ramamoorthy, and P.K. Nair. Novel approaches on the study of wear performance of electroless Ni-P/diamond composite deposits. Journal of Materials Processing Technology 209 (2009) : 1004-1010.
- [13] V.V.N. Reddy, B. Ramamoorthy, and P.K. Nair. A study on the wear resistance of electroless Ni-P/diamond composite coatings. Wear 239 (2000) : 111-116.
- [14] I.D. Marinescu, M. Hitchiner, E. Uhlmann, W.B. Rowe, and I. Inasaki. Handbook of machining with grinding wheels. United State of America: Taylor & Francis group, 2007.
- [15] M. Yan, H.G. Ying, and T.Y. Ma. Improved microhardness and wear resistance of the as-deposited electroless Ni-P coating. Surface and Coatings Technology 202 (2008) : 5909-5913.
- [16] M.H. Staia, E.J. Castillo, E.S. Puchi, B. Lewis, and H.E. Hintermann. Wear performance and mechanism of electroless Ni-P coating. Surface and Coatings Technology 86-87 (1996) : 598-602.
- [17] W.L. Liu, S.H. Hsieh, W.J. Chen, and Y.C. Hsu. Growth behavior of electroless Ni-Co-P deposits on Fe. Applied surface science 255 (2009) : 3880-3883.

- [18] T.S.N.S. Narayanan, S. Selvakumar, and A. Stephen. Electroless Ni-Co-P ternary alloy deposits: preparation and characteristics. Surface and Coatings Technology 172 (2003) : 298-307.
- [19] Y.Y. Tsia, F.B. Wu, Y.I. Chen, P.J. Peng, J.G. Duh, and S.Y. Tsia, Thermal stability and mechanical properties of Ni-W-P electroless deposits, Surface and Coatings Technology 146-147 (2001) : 502-507.
- [20] A. Kumar, A. Singh, M. Kumar, D. Kumar, and S. Barthal, Study on thermal stability of electroless deposited Ni-Co-P alloy thin film, Journal of Materials Science Materials in Electronics 22 (2011) : 1495-1500.
- [21] T.J. Rupert, J.R. Trelewicz, and C. A. Schuh, Grain boundary relaxation strengthening of nanocrystalline Ni-W alloys, Journal of Materials Research 27 (2012) : 1285-1294
- [22] A.J. Detor, and C.A. Schuh, Microstructural evolution during the heat treatment of nanocrystalline alloys, Journal of Materials Research 22 (2007) : 3233-3248.
- [23] J.F. Archard, Contact and Rubbing of Flat Surfaces, Journal of Applied Physics 24(1953) : 981.
- [24] K. Krishnaveni, T.S.N.S. Narayanan, and S.K. Seshadri, Electroless Ni-B coating: preparation and evaluation of hardness and wear resistance, Surface and Coatings Technology 190 (2005) : 115-121.
- [25] Z.H. LI, Z.Y. CHEN, S.S. LIU, F. ZHENG, and A.G. DAI, Corrosion and wear properties of electroless Ni-P plating layer on AZ91D magnesium alloy, Transaction of Nonferrous Metals Society of China 18 (2008) : 819-824.

- [26] M. Palaniappa and S.K. Seshadri, Friction and wear behavior of electroless Ni-P and Ni-W-P alloy coatings, Wear 265 (2008) : 735-740.

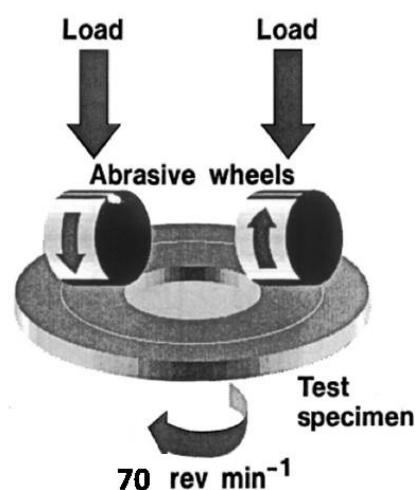
ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

การคำนวณหาความต้านทานการสึกหรอด้วย Taber Abraser wear

วิธีการทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่อง Taber Abraser wear เป็นการทดสอบการสึกหรอแบบ abrasive wear เป็นการทดสอบโดยไม่ใช้สารหล่อลื่น และใช้ Taber Wear Index (TWI) เป็นตัวชี้วัดความต้านทานการสึกหรอของวัสดุ ซึ่งหาค่าจากค่าเฉลี่ยของน้ำหนักของวัสดุที่หายไปภายหลังการทดสอบทุกๆ 1000 รอบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) การทดสอบใช้น้ำหนักกด 1000 กรัม
- 2) ล้อขัด ใช้ CS-10 (rubber wheel) และใช้การดาษทราย CS-11 ขัดเพื่อปรับผิวของล้อขัด เมื่อผ่านการทดสอบทุกๆ 1000 รอบ
- 3) ความเร็วของการหมุนขึ้นงาน 70 รอบต่อนาที
- 4) การหาค่า TWI จะไม่นำน้ำหนักที่หายไปของการทดสอบ 1000 รอบแรกมาคำนวณ



ภาพที่ ก.1 การทดสอบ Taber Abraser wear

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบ Taber Abraser wear

ชิ้นงาน		น้ำหนักการสึกหรอ (มิลลิกรัม)			TWI
		1000 รอบ	2000 รอบ	3000 รอบ	
As-deposited	NP	37.5	56.5	71.0	16.75
	NCP7	31.3	45.5	51.1	12.90
As-annealed 300°C	NP	26.2	38.0	47.9	10.85
	NCP7	13.4	23.2	31.1	8.85



### ภาคผนวก ข

การหาขนาดเกรนด้วยวิธี Integral Breath Method เป็นการหาขนาดเกรนจาก X-ray Diffraction ซึ่งจะมีค่าขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของการหักเหของรังสีเอ็กซ์ที่ขึ้นกับขนาดเกรนของวัสดุ ดังสมการ

$$\frac{(\delta(2\theta))^2}{\tan^2(2\theta)} = \frac{K\lambda}{L} \left( \frac{\delta(2\theta)}{\tan(2\theta)\sin(2\theta)} \right) + 16e^2 \quad (\text{สมการ ข.1})$$

โดยค่าของ  $\delta(2\theta)$  หาได้จากค่า  $\beta$  ซึ่งคือค่า Full Width Half Max (FWHM) หรือค่าความกว้างของพีคในตำแหน่งที่มีความเข้มสูงเป็นครึ่งหนึ่งในบริเวณที่พิจารณา ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมในการ JADE 5 และ  $K$  คือค่าคงที่ มีค่าประมาณ 0.89 ค่า  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของของรังสี X-Ray โดยในงานวิจัยนี้ใช้ target ของ Cu  $K_{\alpha}$  ซึ่งมีค่า 0.154 nm และค่า  $e$  เป็น Microstrain ซึ่งเป็นค่าคงที่

การจำกัดค่าความผิดพลาดของเครื่องมือ หรือ Instrument Broadening โดยหาค่าได้จาก การทำ X-ray Diffraction ของ Lanthanum Hexaboride ( $\text{LaB}_6$ ) จากสมการ

$$\beta = \beta_{\text{exp}} - \frac{\beta_{\text{ins}}^2}{\beta_{\text{exp}}} \quad (\text{สมการ ข.2})$$

โดยข้อมูล X-ray Diffraction ของ Lanthanum Hexaboride สามารถนำมาเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ของความผิดพลาดจากเครื่องที่เปลี่ยนไปตามมุม  $2\theta$  ที่ทำการทดสอบ ซึ่งจากการทดลองสามารถหาความผิดพลาดออกมาได้ ดังสมการ

$$\beta_{\text{ins}} = [(2\theta)^2 \times (6 \times 10^6)] - (0.0007 \times (2\theta)) + 0.0804 \quad (\text{สมการ ข.3})$$

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ – นามสกุล	ก้องกิดาการ ธีรทัตพงศ์
วันเดือนปีเกิด	9 กรกฎาคม 2530
ที่อยู่	บ้านเลขที่ 9 หมู่ที่ 8 ต.ท่าเสา อ.ท่ามะกา จ.กาญจนบุรี 71120
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีการศึกษา 2551
โทรศัพท์ติดต่อ	084-123-3345