

อิทธิพลของกำลังไฟฟ้าในกระบวนการสputtering ที่มีผลต่อ
โครงสร้าง ความแข็ง และคุณสมบัติทางไตรโบโลยี ของฟิล์มบาง
โครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS
EFFECT OF SPUTTERING POWER ON STRUCTURAL
HARDNESS AND TRIBOLOGY PROPERTIES OF
CrN THIN FILM COATED ON ABS PLASTIC



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

อิทธิพลของกำลังไฟฟ้าในกระบวนการสputtering ที่มีผลต่อ
โครงสร้าง ความแข็ง และคุณสมบัติทางไตรโบโลยี ของฟิล์มบาง
โครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS
EFFECT OF SPUTTERING POWER ON STRUCTURAL
HARDNESS AND TRIBOLOGY PROPERTIES OF
CrN THIN FILM COATED ON ABS PLASTIC



T149426

สาธินี ศรีลาศักดิ์

อังค์วรา แสงบุญเกิด

อินทิรา นวลขำ

b. 12884546

i.

ขมู..... 149426
ชทะเบียน..... 8 ส.พ. 2561
มเดือนปี.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF SPUTTERING POWER ON STRUCTURAL
HARDNESS AND TRIBOLOGY PROPERTIES OF
CrN THIN FILM COATED ON ABS PLASTIC



SATINEE SRILASAK
ANGWARA SAENGBUNKOED
INTIRA NOLKHUM

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

อิทธิพลของกำลังไฟฟ้าในกระบวนการสputtering ที่มีผลต่อโครงสร้าง ความแข็ง และคุณสมบัติทางไตรโบโลยี ของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS

Effect of Sputtering Power on Structural Hardness and Tribology Properties of CrN Thin Film Coated on ABS Plastic

ชื่อนักศึกษา

นางสาวสาธินี ศรีลาศักดิ์ รหัสนักศึกษา 55051635

นางสาวอังคิรา แสงบุญเกิด รหัสนักศึกษา 55051676

นางสาวอินทิรา นวลขำ รหัสนักศึกษา 55051678

ปริญญา

วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา

ฟิสิกส์



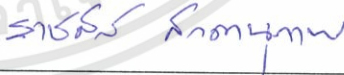

ปีการศึกษา

2558

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.อาภาภรณ์ สกุลการะเวก

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข ประธานกรรมการ	
ดร.พิศาล สุขวิสูตร กรรมการ	
ดร.ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ กรรมการ	
ดร.อาภาภรณ์ สกุลการะเวก กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	อิทธิพลของกำลังไฟฟ้าในกระบวนการสเปตเตอร์ริงที่มีผลต่อโครงสร้าง ความแข็ง และคุณสมบัติทางไตรโบโลยี ของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวสาธินี ศรีลาศักดิ์	รหัสนักศึกษา 55051635
	นางสาวอังคณา แสงบุญเกิด	รหัสนักศึกษา 55051676
	นางสาวอินทิรา นวลขำ	รหัสนักศึกษา 55051678
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)	
ภาควิชา	ฟิสิกส์	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)	
ปีการศึกษา	2558	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.อภาภรณ์ สุกุลการะเวก	

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ลงบนพลาสติกชนิด ABS โดยวิธีดีซีรีแอคทีฟแมกนีตรอนสเปตเตอร์ริง ที่กำลังไฟฟ้า 125 W, 150 W, 175 W และ 200 W เพื่อศึกษากำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อคุณสมบัติของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS โดยทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD), วิเคราะห์สมบัติด้านความแข็งด้วยเทคนิค Nano indentation hardness, วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิค Atomic Force Microscopy (AFM) และวิเคราะห์สมบัติทาง Tribology ด้วยเครื่องวิเคราะห์ Tribology ด้วยเทคนิค pin on dish การวิเคราะห์ XRD พบระนาบที่โดดเด่นคือระนาบ (111) และที่ กำลังไฟฟ้า 150 W ขนาดของผลึกจะมีขนาดที่ใหญ่ที่สุดในด้านของการวิเคราะห์ Nano Indentation Hardness พบว่าเมื่อมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งและค่าความยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังไฟฟ้า โดยที่ กำลังไฟฟ้า 175 W มีค่าความแข็งมากที่สุด แต่เมื่อมีการจ่าย กำลังไฟฟ้าที่ 200 W ค่าความแข็งกลับมีค่าลดลง เนื่องจากในการเคลือบฟิล์มบางที่กำลังไฟฟ้าที่สูงมากจนเกินไป ช่องว่างระหว่างโครงสร้างฟิล์มบางจะขยายออกกว้างมากขึ้น เป็นผลให้โครงสร้างของฟิล์มบางมีความหนาแน่นน้อยลง ทำให้ความแข็งของฟิล์มบางลดน้อยลงตามไปด้วย จากการวิเคราะห์ Tribology ด้วยเทคนิค pin on dish พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) มีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพลาสติกชนิด ABS จากการวิเคราะห์ AFM ค่าความขรุขระของพลาสติกชนิด ABS มีค่ามากกว่าค่าความขรุขระของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS และจากผลการวิเคราะห์ดังกล่าว สามารถสรุปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่ากำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนพลาสติกชนิด ABS นั้นคือที่ กำลังไฟฟ้า 175 W โดยที่ขนาดของผลึกนั้น ไม่ได้มีผลโดยตรงต่อค่าความแข็งของฟิล์มบาง และใน การเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ลงบนพลาสติกชนิด ABS ที่กำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกันนั้น ไม่ได้ ส่งผลต่อความเรียบของผิวหน้าฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ เนื่องจากผลที่ได้จากการวิเคราะห์ AFM พบว่าค่าความขรุขระของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์มีค่าที่ใกล้เคียงกัน ด้วยความเรียบที่มากขึ้นส่งผล ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์นั้น มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับรายงานอื่น

คำสำคัญ: พลาสติกชนิด ABS ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ การ วัดความแข็งด้วยระดับนาโน กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ไตรโบโลจี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Effect of Sputtering Power on Structural Hardness and Tribology Properties of CrN Thin Film Coated on ABS Plastic		
Students	Miss Satinee Srilasak	Student ID	55051635
	Miss Angwara Saengbunkoed	Student ID	55051676
	Miss Intira Nolkhum	Student ID	55051678
Degree	Bachelor of Science (Applied physics)		
Department	Physics		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2015		
Advisor	Dr.Aparpon Sakulkalavek		

Abstract

This work aimed to investigate the effect of sputtering power on the hardness and wear resistance of chromium nitride (CrN) thin films deposited on the acrylonitrile butadiene styrene (ABS) substrates. These coatings were performed by a reactive DC magnetron sputtering technique. The values of sputtering power were adjusted in the range of 125-200 W. The total pressure (P_t), nitrogen partial pressure (P_{N_2}), and sputtering time were kept constant at 4×10^{-3} mbar, 30%, and 120 min, respectively. The surface roughness of the thin films was characterized by atomic force microscopy (AFM). The crystalline structure of these CrN thin films was studied using X-ray diffraction (XRD). The hardness and Young's modulus of the CrN coated ABS samples were analyzed by a nanoindentation hardness test. Wear resistance tests under ambient air condition at room temperature were carried out by pin-on-disc method. The wear scars of the samples were determined by scanning electron microscope (SEM). The results showed that the hardness values were varied from 6.65 to 9.58 GPa. Young's modulus of the samples was changed from 30.87 to 44.25 GPa. The CrN coating deposited on the ABS substrate at 175 W exhibited the highest hardness of 9.58 GPa which value is as high as that of steel. This indicated its potential and promising applications as hard coating layers for ABS plastic parts.

Keywords: Acrylonitrile Butadiene Styrene, Chromium nitride thin film, X-ray

diffraction, Nanoindentation hardness, Atomic Force Microscopy, Tribology

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความกรุณาและความร่วมมือของทุกๆ ท่าน ขอขอบพระคุณ ดร.อาภาภรณ์ สุกุลการเวก อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ได้ให้คำแนะนำ และให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด ทั้งยังแนะนำแนวทางที่ดีในการแก้ไขจุดบกพร่องของโครงการพิเศษฉบับนี้ และขอขอบพระคุณกรรมการสอบโครงการพิเศษ คือ ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข และ ดร.พิศาล สุขวิสูตร ที่ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร.ราชศักดิ์ ศักตานุภาพ อาจารย์ประจำวิทยาลัยนวัตกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และสอนการใช้งานเครื่องมือที่ใช้ในการทำโครงการพิเศษนี้ตลอดมา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์วิจิต ศรีโซติ อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ และคุณณัฐกฤษ สมดอก ที่ได้คำปรึกษารวมทั้งช่วยเหลือในด้านของการเตรียมวัสดุจากพลาสติกชนิด ABS ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ใช้ในการทำโครงการพิเศษนี้

ขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาจนได้นำความรู้ที่ได้ร่ำเรียนมาใช้ในโครงการพิเศษนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนในการศึกษาตลอดจนคอยเลี้ยงดู อบรมสั่งสอน รวมถึงเป็นกำลังใจและเป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อีกทั้งเพื่อนๆ และบุคคลอื่นๆ ที่มีได้กล่าวมา ผู้จัดทำโครงการพิเศษขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

สาธินี ศรีลาศักดิ์

อังค้วรา แสงบุญเกิด

อินทิรา นวลขำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ระยะเวลาดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เทคโนโลยีการเคลือบฟิล์มบาง	4
2.1.1 การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีการทางฟิสิกส์	5
2.2 กระบวนการสปัตเตอริง (Sputtering Process)	5
2.2.1 ระบบเคลือบแบบ ดีซี สปัตเตอริง	5
2.2.2 ระบบเคลือบแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง	6
2.2.3 ระบบเคลือบแบบรีแอคทีฟสปัตเตอริง	7
2.3 สมบัติของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์	8
2.4 เทคนิคการวิเคราะห์ต่างๆ ที่ใช้ในโครงการวิจัย	9
2.4.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)	9
2.4.2 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy)	11
2.4.3 เทคนิค Nano Indentation Hardness	14
2.4.4 เทคนิค Tribology	24
2.4.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)	30
2.4.6 กล้องจุลทรรศน์ชนิด Light microscope	31
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	34
3.1 การเตรียมพลาสติกชนิด ABS เพื่อใช้เป็นฐานรองรับ	34
3.1.1 อุปกรณ์	34
3.1.2 การเตรียมพลาสติกชนิด ABS	35
3.2 การเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ด้วยวิธีดีซีรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.1 ส่วนประกอบของเครื่อง	38
3.3 ขั้นตอนการใช้เครื่องในการเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN)	40
3.3.1 ขั้นตอนในการเคลือบ	40
3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ	46
3.4.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ X-ray diffraction	46
3.4.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ Nano Indentation Hardness	48
3.4.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ Tribology	51
3.4.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์กล้อง Microscope	56
3.4.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ Scanning electron microscope	57
3.4.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์ Atomic Force Microscopy, AFM	58
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	62
4.1 ผลการวิเคราะห์ X-ray diffraction	62
4.2 ผลการวิเคราะห์ Nano Indentation Hardness	66
4.3 ผลการวิเคราะห์ กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม Atomic Force Microscopy	69
4.4 ผลการวิเคราะห์ Tribology	71
4.4.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	71
4.4.2 ผลการวิเคราะห์จากกล้อง Microscope	73
4.4.3 ผลการวิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM).	75
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	76
5.1 สรุปผลวิจัย	76
5.2 ข้อเสนอแนะ	77
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	
ภาคผนวก ข	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
1.1	ระยะเวลาดำเนินงาน.	2
3.1	เงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์	40
4.1	ค่าคงที่ผิวลึกลับและขนาดของผลึก	63
4.2	ค่า Texture coefficient; $T_{c(hkl)}$ ที่ได้จากการคำนวณ	64
4.3	ค่าความแข็งที่ได้จากการวิเคราะห์ Nano Indentation Hardness	68
4.4	ค่าElastic modulusที่ได้จากการวิเคราะห์ Nano Indentation Hardness	68
4.5	ค่า Roughness ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม	69



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ	4
2.2 ระบบสปัตเตอร์แบบดีซีสปัตเตอร์	6
2.3 ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านสนามแม่เหล็ก	6
2.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก	7
2.5 ระบบเคลือบแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอร์	7
2.6 ระบบเคลือบแบบรีแอคทีฟสปัตเตอร์	8
2.7 (a) การจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกแบบ fcc (b) การจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกแบบ hcp	9
2.8 เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	9
2.9 การทำงานของเครื่อง X-ray diffraction	10
2.10 การพิสูจน์สมการแบรกก์	10
2.11 แสดงองค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Scanning Probe Microscope ในแบบ Atomic Force Microscopy	11
2.12 แสดงลักษณะ ของแรงกระทำระหว่างอะตอมที่เกิดขึ้นในระยะห่างระหว่างวัตถุต่างๆ กัน	12
2.13 แสดงภาพที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของเข็มปลายแหลมไปบนผิวงาน	12
2.14 รอยกดจากการทดสอบ	14
2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะความลึกกับแรง	15
2.16 หัวกดแบบ Berkovich ใช้ทดสอบความแข็งแบบรอยกดระดับนาโน	16
2.17 เส้น load ที่ตอนกดหัวกดและตอนปลดออก	17
2.18 แผนภาพแสดงของกระบวนการกด แสดงการยุบตัวลงที่เกิดขึ้นในระหว่างการกดหัวกด	17
2.19 แผนภาพการเปลี่ยนแปลงของรอยกดที่แสดงพื้นที่การพิมพ์ที่เหลืออยู่หลังจากถอนหัวกดออก	18
2.20 แผนภาพสรุปการคำนวณที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค Nano-Indentation Hardness	22
2.21 แผนภาพแสดงตัวอย่างเส้นโค้งของโพลระหว่างแรงและความลึกของหัวกดของวัสดุเป็น elastic – plastic	23
2.22 (a) การเสียดทานแบบลื่นไถล (b) การเสียดทานแบบ	25
2.23 การหล่อลื่นชนิดไร้สารหล่อลื่น	26
2.24 การสึกหรอแบบยึดติด	27
2.25 การสึกหรอแบบขูดขีด	27
2.26 การทดสอบแบบพินอินดิสก์	29
2.27 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	30
2.28 สัญญาณต่างๆ ที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างสารตัวอย่างกับลำอิเล็กตรอน	31
2.29 กล้องจุลทรรศน์ชนิด Light microscope	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 อุปกรณ์ในการเตรียมพลาสติกชนิด ABS เพื่อใช้เป็นฐานรองรับ	
(a) พลาสติกชนิด ABS	
(b) น้ำยาล้างจานและฟองน้ำ	
(c) กระดาษเช็ดทำความสะอาด	
(d) เครื่องอัลตราโซนิก	
(e) กระดาษทราย	
(f) ที่เป่าลม	
(g) เครื่องอบ	
(h) ผงเพชร ขนาดอนุภาค 0.1 ไมครอน	34
3.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมฐานรองรับ	35
3.3 ขั้นตอนการขัดพลาสติกชนิด ABS ด้วยกระดาษทรายและผงเพชร	35
3.4 ขั้นตอนการล้างพลาสติกชนิด ABS ด้วยน้ำยาล้างจาน	36
3.5 ขั้นตอนการล้างพื้นผิวด้วย เครื่องอัลตราโซนิก	36
3.6 ขั้นตอนการเป่าพลาสติกชนิด ABS ให้แห้ง	36
3.7 ขั้นตอนการเช็ดทำความสะอาด	37
3.8 ขั้นตอนการอบพลาสติกชนิด ABS	37
3.9 ภาพแสดงเครื่องดีซีรีแอกทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง	38
3.10 ส่วนประกอบของเครื่อง	
(a) ภาชนะสุญญากาศ	
(b) ระบบหล่อเย็น	
(c) แหล่งจ่ายไฟในระบบ	
(d) แหล่งจ่ายไฟในการหมุนแท่นวางชิ้นงาน	
(e) ถังแก๊สที่ใช้ในการเคลือบ	
(f) ปัมดูดอากาศ (Rotary pump)	
(g) ถังควบคุมความดันแก๊ส	
(h) แผงควบคุมความดันในห้องเคลือบ	39
3.11 เตรียมห้องสุญญากาศให้มีอากาศภายในเท่ากับภายนอก	40
3.12 การเปิดตัวล็อกฝาห้องสุญญากาศ	41
3.13 ขั้นตอนการวางชิ้นงาน	41
3.14 ขั้นตอนการวางแท่นวางชิ้นงานบนจานรองแผ่นรองรับ	41
3.15 การปิดฝาห้องสุญญากาศ	42
3.16 ล็อกฝาห้องสุญญากาศและดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศ	42
3.17 การเปิด Division pump	43
3.18 การดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศทำให้ความดันภายในลดลง	43
3.19 แสดงความดันในห้องเคือบบนแผงควบคุม	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารทูลงงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.20 power supply	44
3.21 ปรับความดันแก๊สไนโตรเจนและแก๊สอาร์กอน	44
3.22 หมุนแกนเหล็กเพื่อเปิดเป่าก่อนการเคลือบ	45
3.23 หมุนแกนเหล็กเพื่อปิดเป่าก่อนการเคลือบ	45
3.24 ส่วนประกอบของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	46
3.25 การนำติดชิ้นงานบนฐานรองชิ้นงาน	47
3.26 วางชิ้นงานบนฐานรองวัสดุรองรับ	47
3.27 กราฟที่ได้จากการประมวลผลของโปรแกรม DIFFRAC plus XRD Commander	47
3.28 เครื่องวิเคราะห์ Nano Indentation Hardness	48
3.29 ส่วนประกอบของเครื่องวิเคราะห์ Nano Indentation Hardness	48
3.30 การติดชิ้นงานบนฐานรองชิ้นงาน	49
3.31 การส่องพื้นผิวของชิ้นงาน	49
3.32 การเลื่อนฐานรองชิ้นงานให้ตรงกับหัววัดและทำการวัดชิ้นงาน	50
3.33 กราฟที่ได้จากโปรแกรม CSM Instruments software	50
3.34 เครื่อง Tribology	51
3.35 ลักษณะของ ดิสก์และพิน	51
3.36 ชิ้นงานที่ติดบน ดิสก์	52
3.37 การล้างทำความสะอาดลูกบอลแบร์ริง	52
3.38 การนำลูกบอลแบร์ริงใส่ในพิน	52
3.39 การติดตั้งพินกับตัวเครื่อง	53
3.40 การวิเคราะห์พลาสติกชนิด ABS โดยใช้โหลด 20 N	53
3.41 (a) การวิเคราะห์ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบบนพลาสติกชนิด ABS ด้วยกำลังไฟฟ้า 125 W โดยใช้โหลด 20 N	
(b) การวิเคราะห์ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบบนพลาสติกชนิด ABS ด้วยกำลังไฟฟ้า 175 W โดยใช้โหลด 20 N	54
3.42 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงานของเครื่อง Tribology	54
3.43 ชิ้นงานพลาสติกชนิด ABS ที่ได้จากการวิเคราะห์ Tribology โดยใช้โหลด 20 N	55
3.44 (a) ชิ้นงานฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS ด้วยกำลังไฟฟ้า 125 W ที่ได้จากการวิเคราะห์ Tribology โดยใช้โหลด 10 N	
(b) ชิ้นงานฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS ด้วยกำลังไฟฟ้า 175 W ที่ได้จากการวิเคราะห์ Tribology โดยใช้โหลด 10 N	55
3.45 ลูกบอลแบร์ริงที่กดลงบนพลาสติกชนิด ABS โดยใช้โหลด 20 N	55

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.46 (a) ลูกบอลแข็งที่กดลงบนฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS ที่กำลังไฟฟ้า 125 W โดยใช้โหลด 10 N	
(b) ลูกบอลแข็งที่กดลงบนฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS ที่กำลังไฟฟ้า 175 W โดยใช้โหลด 10 N	56
3.47 ส่วนประกอบของเครื่องวิเคราะห์ Microscope	56
3.48 ลักษณะการวางชิ้นงานลงบนจานหมุน	57
3.49 การติดลูกบอลแข็งกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	57
3.50 การปิดภาชนะสุญญากาศ	58
3.51 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม	58
3.52 การทำความสะอาดชิ้นงานด้วยเมทานอล	59
3.53 การติดชิ้นงานกับกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม	59
3.54 หมุนปรับระยะของเข็ม	59
3.55 กดปรับโฟกัส	60
3.56 เลื่อนปรับหาบริเวณที่ต้องการวัด	60
3.57 ลักษณะบริเวณพื้นผิวที่ทำการวิเคราะห์ของพลาสติกชนิด ABS และฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN)	
(a) พลาสติกชนิด ABS	
(b) กำลังไฟฟ้า 125 W	
(c) กำลังไฟฟ้า 150 W	
(d) กำลังไฟฟ้า 175 W	
(e) กำลังไฟฟ้า 200 W	61
3.58 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ที่แสดงบนคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในควบคุม	61
4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS ด้วยกำลังไฟฟ้า 125 W, 150 W, 175 W และ 200 W	62
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังไฟฟ้า กับ ขนาดของผลึก	64
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Power (w) กับ Texture Coefficient	65
4.4 ผลที่ได้จากการวัด Nano Indentation Hardness ที่แสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Force (mN) กับ Penetration (nm)ของ พลาสติกชนิด ABS กับพลาสติกชนิด ABS ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์	
(a) พลาสติกชนิด ABS	
(b) กำลังไฟฟ้า 125 W	
(c) กำลังไฟฟ้า 150 W	
(d) กำลังไฟฟ้า 175 W	
(e) กำลังไฟฟ้า 200 W	67
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Power (W) กับ Hardness และ Elastic modulus	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของพลาสติกชนิด ABS และของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS (a) พลาสติกชนิด ABS (b) กำลังไฟฟ้า 125 W (c) กำลังไฟฟ้า 150 W (d) กำลังไฟฟ้า 175 W (e) กำลังไฟฟ้า 200 W	70
4.7 ค่าที่วัดได้จากการวิเคราะห์ Tribology ซึ่งแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ของพลาสติกชนิด ABS โดยใช้โหลด คือ 10 N	71
4.8 ค่าที่วัดได้จากเทคนิค Tribology ที่แสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง เวลา กับ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพลาสติกชนิด ABS เคลือบด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ โดยใช้โหลด คือ 10 N (a) 125 W (b) 175 W	72
4.9 ภาพจากกล้อง Microscope ของพลาสติกชนิด ABS โดยใช้โหลด คือ 10 N (a) กำลังขยาย 50X (b) กำลังขยาย 100X (c) กำลังขยาย 500X	73
4.10 ภาพจากกล้อง Microscope ของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS ด้วยกำลังไฟฟ้า 125 W โดยใช้โหลด คือ 10 N (a) กำลังขยาย 50X (b) กำลังขยาย 100X (c) กำลังขยาย 500X	73
4.11 ภาพจากกล้อง Microscope ของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS ด้วยกำลังไฟฟ้า 175 W โดยใช้โหลด คือ 10 N (a) กำลังขยาย 50X (b) กำลังขยาย 100X (c) กำลังขยาย 500X	74
4.12 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของลูกบอลแบริ่งที่ใช้กดลงบนพลาสติกชนิด ABS โดยโหลดที่ใช้ คือ 10 N ที่กำลังขยาย 100X	74
4.13 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของลูกบอลแบริ่งที่ใช้กดลงบนฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS โดยโหลดที่ใช้ คือ 10 N ที่ กำลังขยาย 100X (a) กำลังไฟฟ้า 125 W (b) กำลังไฟฟ้า 175 W	74

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
Å	อังสตรอม
ABS	พลาสติกชนิด ABS ที่ประกอบไปด้วย อะคริโลไนไตรล์ โพลิบิวทาไดอิน และสไตรีน
Ar	แก๊สอาร์กอน
N	แก๊วไนโตรเจน
Cr	โครเมียม
CrN _x	โครเมียมไนไตรด์
<i>d</i>	ระยะห่างระหว่างลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบลงบนระนาบ
θ	ตำแหน่งมุมหักเหของพีค
<i>n</i>	เลขจำนวนเต็ม
λ	ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
$(h-h_p)$	การขยายตัวที่แทนที่
h_c	ความถี่รอยกอดของหัวกด
h_s	การแทนที่ของพื้นผิวที่ขอบของการสัมผัส
A_p	ค่าความแข็งที่ต้องการกำหนด
E_i	ความยืดหยุ่น
F_m	แรงกดที่ใช้กดหัววัด
$I(hkl)$	ค่าความเข้มที่ได้จากการวัด ของระนาบ (<i>hkl</i>)
$I_0(hkl)$	ค่าความเข้มมาตรฐานของระนาบ (<i>hkl</i>) จากฐานข้อมูล
$T_c(hkl)$	ค่า texture coefficient ของระนาบ (<i>hkl</i>)
V_{yx}	อัตราส่วนของบัวของ
\mathcal{E}_l	ความเครียดตามแนวแรง
\mathcal{E}_t	ความเครียดตามขวาง
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
XRD	เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
AFM	กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม
μ	ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
<i>A</i>	พื้นที่หน้าตัดของรอยกอด
<i>F</i>	โหลดที่ใช้ในการวัด
<i>FWHM</i>	ค่าความกว้างของพีคที่ระยะเป็นครึ่งหนึ่งของระยะสูงสุด
<i>H</i>	ค่าความแข็ง

คำย่อ/สัญลักษณ์(ต่อ)

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
N	จำนวนของระนาบ
k	ค่าคงที่ของรังสีเอกซ์
GPa	จิกะปาสคาล
x	ค่าแรงดันไฟฟ้า
y	ค่าแรงเสียดทาน
$mbar$	มิลลิบาร์
mm	มิลลิเมตร
nm	นาโนเมตร
μm	ไมโครเมตร
W	วัตต์ (หน่วยของกำลังไฟฟ้า)
JCPDs	ฐานข้อมูลมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมแม่พิมพ์เป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญและเป็นส่วนช่วยสนับสนุนอุตสาหกรรมการผลิตอื่นๆ เกือบทุกประเภท เช่น อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์หรือแม่พิมพ์อุตสาหกรรมของเด็กเล่น เป็นต้น แม่พิมพ์ที่ดีนั้นจะส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และยังสามารถผลิตชิ้นส่วนได้อย่างรวดเร็วและได้จำนวนครั้งละมากๆ ทั้งยังมีรูปร่างและขนาดที่ได้มาตรฐาน ช่วยลดต้นทุนในการผลิต และยังสามารถลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตได้อีกด้วย แม่พิมพ์จะมีหลายรูปแบบ เช่น แม่พิมพ์เพื่อการบีบโลหะขึ้นรูป แม่พิมพ์เพื่อการฉีดและการเป่าพลาสติก เป็นต้น แม่พิมพ์ส่วนใหญ่จะทำจากโลหะนำมาขึ้นรูปให้ได้ลักษณะตามที่ต้องการและในขณะที่มีการใช้งานจะมีการเสียดสี เกิดรอยขีดข่วนที่นำไปสู่การสึกหรอ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ทำให้คุณภาพในการผลิตไม่เป็นไปตามที่ต้องการ นอกจากนี้ยังพบว่า ในปัจจุบันมีการพัฒนาที่รวดเร็วของเทคโนโลยีอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนต่างๆ มีการเปลี่ยนรูปร่างลักษณะเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค ทำให้ต้องเปลี่ยนรูปแบบของแม่พิมพ์อยู่ตลอดเวลา ดังนั้นการใช้แม่พิมพ์ที่ทำจากโลหะจึงมีต้นทุนที่สูง โครงการพิเศษนี้จึงมีแนวคิดนำพลาสติกชนิด ABS มาประยุกต์เป็นแม่พิมพ์ โดยมีการปรับปรุงผิวของวัสดุโดยการเคลือบด้วยฟิล์มบาง

กระบวนการเคลือบด้วยฟิล์มบางที่ได้รับความนิยมในภาคอุตสาหกรรม คือ การเคลือบผิวด้วยวิธีไอทางกายภาพ (physical vapor deposition: PVD) และการเคลือบผิวด้วยวิธีไอทางเคมี (chemical vapor deposition: CVD) ซึ่งเป็นกระบวนการที่สะอาดและปลอดภัย ในโครงการพิเศษนี้ได้เลือกวิธีการปรับปรุงคุณภาพของแม่พิมพ์ที่ทำจากพลาสติกชนิด ABS โดยการเคลือบผิวด้วยวิธีไอทางกายภาพ (physical vapor deposition: PVD) โดยใช้วิธีดีซีรีแอกทีฟแมกเนตรอนสปัตเตอร์ริง (DC Reactive Magnetron Sputtering) เนื่องจากสามารถเตรียมฟิล์มบางได้ที่อุณหภูมิห้องอีกทั้งมีไอออนปริมาณมากที่เกิดขึ้นในกระบวนการเคลือบที่ได้จากการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับเป้าและตกไปยังแผ่นรองรับและช่วยปรับเปลี่ยนโครงสร้างและสมบัติของฟิล์มทำให้สามารถประยุกต์ไปสู่การเคลือบชิ้นงานขนาดใหญ่ในระดับอุตสาหกรรมได้ง่าย

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบสปัตเตอร์ริงต่อสมบัติเชิงโครงสร้าง ความแข็ง สภาพยึดติด และสมบัติทางไดรโพลีจิกของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบบนพลาสติกชนิด ABS

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ลงบนพลาสติกชนิด ABS
- 2) เพื่อศึกษาอิทธิพลของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบสเปตเตอร์ริงต่อสมบัติเชิงโครงสร้าง ความแข็ง และสมบัติทางไดรโบลจี้ของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) เคลือบฟิล์มบาง CrN ลงบนพลาสติกชนิด ABS โดยวิธีดีซีรีแอกทีฟแมกนีตรอนสเปตเตอร์ริง (DC Reactive Magnetron Sputtering) โดยกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มที่ 125 W, 150 W, 175 W และ 200 W
- 2) วิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction)
- 3) วิเคราะห์ความเรียบด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy)
- 4) วิเคราะห์ลักษณะคุณสมบัติด้านทานการสึกหรอของฟิล์มด้วยกระบวนการ Tribology
- 5) วิเคราะห์ความแข็งของฟิล์มด้วยเทคนิค Nano Indentation Hardness

1.4 ระยะเวลาดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาดำเนินงาน

ระยะเวลา	ขั้นตอนการดำเนินงาน
เมษายน พ.ศ.2558	พบอาจารย์ที่ปรึกษาเพื่อเลือกหัวข้องานวิจัยและวางแผนการดำเนินงาน
พฤษภาคม พ.ศ.2558	ศึกษาและค้นคว้าข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ในงานวิจัย
สิงหาคม พ.ศ.2558	ทำการเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ด้วยวิธี ดีซีรีแอกทีฟแมกนีตรอนสเปตเตอร์ริงทั้งหมด 4 ชุด โดยที่แต่ละชุดมีการเคลือบด้วยกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าแตกต่างกัน
กันยายน ตุลาคม พ.ศ.2558	นำฟิล์มที่ได้มาทำการวัดผลต่างๆ
ธันวาคม มกราคม พ.ศ.2558	นำผลที่ได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์เพื่อหาข้อสรุปในหัวข้อต่างๆของฟิล์มแต่ละชุด
มีนาคม พ.ศ. 2559	สรุปผลการทดลองทั้งหมด

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

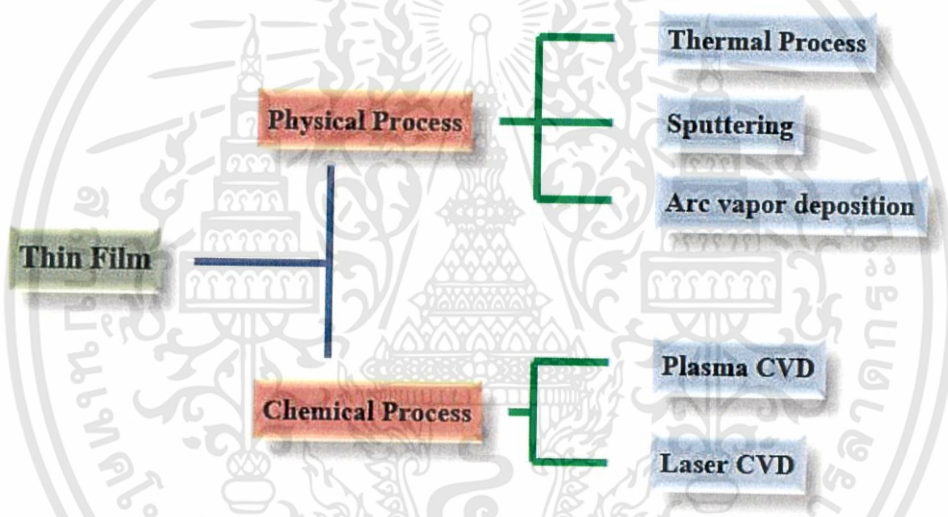
- 1) ทราบถึงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ ที่เคลือบด้วยวิธีการดีซีรีแอกทีฟแมกนี-ตรอนสปีดเตอริง
- 2) วิธีการนี้เป็นการเคลือบผิวในระบบสุญญากาศ จำกัดเฉพาะภายในแชมเบอร์สุญญากาศ จึงไม่ทำให้สิ่งแวดล้อมทั้งอากาศและแหล่งน้ำเสีย ซึ่งจะเข้ามาแทนที่การชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าในที่ใช้ในปัจจุบัน
- 3) ผลสำเร็จของงานวิจัยนี้คาดหวังว่าจะเป็นประโยชน์โดยตรงต่อภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในการปรับปรุงลักษณะพื้นผิวของแม่พิมพ์



บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคโนโลยีการเคลือบฟิล์มบาง

การเคลือบผิววัสดุมีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนแปลงและปรับปรุงสมบัติของวัสดุให้เป็นไปตามที่ต้องการ ทั้งนี้การปรับปรุงคุณภาพผิววัสดุวิธีหนึ่ง คือ การเคลือบด้วยสารที่มีลักษณะเป็นชั้นเคลือบบางๆ ที่เรียกว่า “ฟิล์มบาง (thin film)” บนผิววัสดุ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันการเคลือบผิวชิ้นงานส่วนใหญ่จะนิยมใช้วิธีทางเคมี เช่น การเคลือบด้วยไฟฟ้า (electroplating) แต่การเคลือบวิธีนี้มีข้อเสียคือคุณภาพของผิวเคลือบต่ำอีกทั้งยังมีปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม จึงมีการวิจัยและพัฒนาเทคนิคการเคลือบใหม่ทดแทน ได้แก่ “การเคลือบในสุญญากาศ (vacuum coating)” เนื่องจากการเคลือบนี้เกิดขึ้นเฉพาะในสุญญากาศและไม่ใช้สารเคมีที่จะทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมในกระบวนการเคลือบ โดยการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ

- 1) การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางเคมี เป็นการเคลือบที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพของแก๊สและเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ ตกเคลือบบนวัสดุรองรับ เช่น วิธี Plasma CVD และวิธี Laser CVD เป็นต้น
- 2) การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ เป็นการเคลือบที่อาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจาย หรือ วิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับ เช่น วิธีการระเหย (Evaporation) และวิธีสปัตเตอร์ริง (Sputtering) เป็นต้น

2.1.1 การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีการทางฟิสิกส์

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีการทางฟิสิกส์นั้นอาศัยหลักการทำให้อะตอมหลุดออกจากผิวของสารเคลือบแล้วเคลื่อนที่ไปยังพื้นผิวของแผ่นรองรับและทับถมกันเกิดเป็นชั้นของฟิล์มภายใต้สภาวะสุญญากาศ การเคลือบฟิล์มด้วยวิธีการทางฟิสิกส์ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

- 1) สร้างสารเคลือบให้เป็นอะตอม โมเลกุล หรืออนุภาคจากแหล่งกำเนิด (source)
- 2) เคลื่อนย้ายสารเคลือบไปยังแผ่นรองรับ (substrate)
- 3) ทำให้สารเคลือบควบแน่นและเกิดการทับถมเป็นชั้นของฟิล์มบาง

พลังงานพันธะระหว่างอะตอมของสารเคลือบกับแผ่นรองรับและอุณหภูมิของแผ่นรองรับจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการแพร่ของสารเคลือบบนผิวแผ่นรองรับนั้น

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีการทางฟิสิกส์ (Physical Vapor Deposition) แบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก ได้แก่

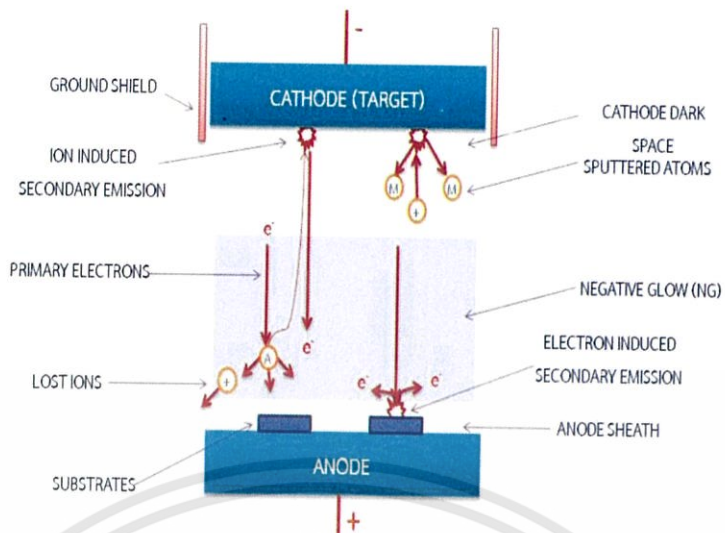
- 1) การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสาร (Evaporation)
- 2) การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีการสปัตเตอริง (Sputtering)

2.2 กระบวนการสปัตเตอริง (Sputtering Process)

วิธีการสปัตเตอริง เป็นกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของเป้าเม็ดยุติ (Target) หลุดออกมาเนื่องจากการชนกันของอนุภาคที่มีพลังงานสูง ในระหว่างการชนหรือกระทบกันจะเกิดการถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมให้กับอะตอมที่ถูกชนและอะตอมใกล้เคียง การที่อะตอมบริเวณผิวหน้าของสารสามารถเคลื่อนที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของสารนั้นได้ จะต้องมีความเร็วที่เพียงพอ ที่จะชนะแรงยึดเหนี่ยวทางเคมีกับอะตอมใกล้เคียง และเป็นพลังงานจลน์ให้กับอะตอมที่หลุดออกมาจากผิวสาร ซึ่งเป็นวิธีการที่อาศัยหลักการพื้นฐานทางด้านฟิสิกส์ของพลาสมา ซึ่งเป็นการปลุกฟิล์มที่เป็นโลหะ วัสดุสารกึ่งตัวนำหรือฉนวนก็ได้ ในปัจจุบันสปัตเตอริงใช้กับการปลุกฟิล์มบางเป็นหลัก สำหรับเครื่องมือสปัตเตอริงที่ใช้ทั่วไปสามารถแบ่งได้ดังนี้

2.2.1 ระบบเคลือบแบบ ดีซี สปัตเตอริง

ระบบเคลือบแบบ ดีซี สปัตเตอริง ประกอบด้วยคาโทด คือ แผ่นเป้าสารเคลือบ และแอโนด ใช้เป็นที่วางวัสดุรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ ปกติระยะระหว่างคาโทดและวัสดุรองรับจะอยู่ระหว่าง 4-10 cm เพื่อป้องกันการสูญเสียอะตอมสารเคลือบออกด้านข้างหรือผนังของภาชนะสุญญากาศ ซึ่งตัววัสดุรองรับจะมีอุปกรณ์ทำความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับวัสดุรองรับในขณะที่เคลือบฟิล์ม ในการเคลือบก่อนอื่นจะต้องทำการดูดอากาศออกจากห้องเคลือบ (chamber) เพื่อทำให้เป็นห้องสุญญากาศจนได้ความดันที่ต้องการ (อยู่ในช่วง 10^{-5} - 10^{-6} Torr) จากนั้นทำการปรับแรงดันระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนดแล้วทำการปรับความดันของก๊าซเฉื่อย ซึ่งก๊าซเฉื่อยทำให้อิเล็กตรอนไม่ทำปฏิกิริยากับเป้าสารเคลือบ (ปกติใช้ก๊าซอาร์กอน) จากนั้นก๊าซอาร์กอนจะแตกตัวเป็นไอออนบวกพุ่งชนเป้าเนื่องจากสนามไฟฟ้าค่าสูงที่กระทำต่อเป้าเป็นผลให้อะตอมของเป้าหลุดเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิไปสู่ชิ้นงานและก่อตัวเป็นฟิล์มบางบนชิ้นงานดังรูปที่ 2.2



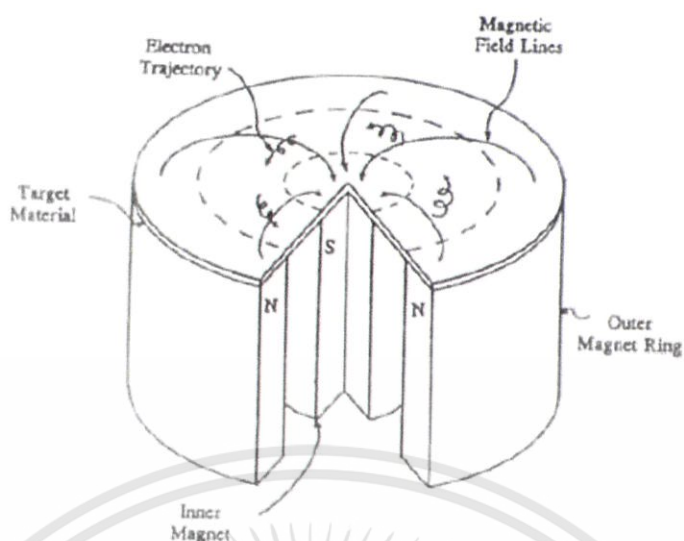
รูปที่ 2.2 ระบบสปัตเตอริงแบบดีซีสปัตเตอริง

2.2.2 ระบบเคลือบแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง

ระบบ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง ซึ่งเป็นการใช้สนามแม่เหล็กช่วย โดยจ่ายสนามแม่เหล็กให้มีทิศทางกับผิวหน้าเป้าสารเคลือบและมีทิศตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าซึ่งจะช่วยเพิ่มระยะทางเดินของอิเล็กตรอนให้ยาวขึ้น โดยอำนาจของสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นทาง ทำให้การไอออนไนซ์เนื่องจากการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมแก๊สเฉื่อยมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้อัตราการสปัตเตอริงสูงขึ้นด้วย

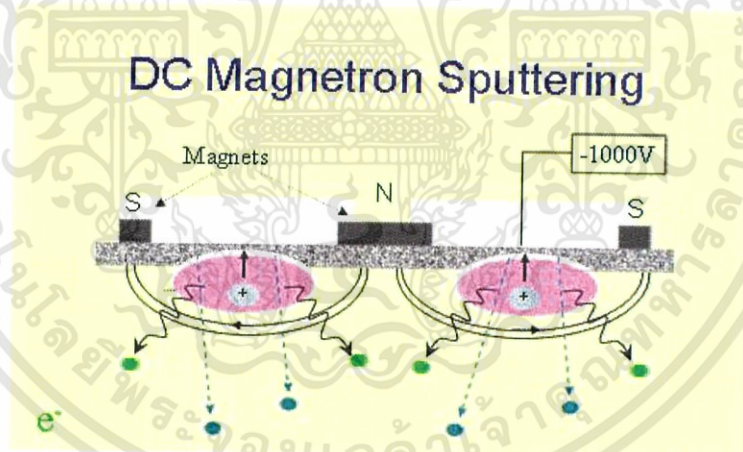


รูปที่ 2.3 ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก

อิเล็กตรอนมีทิศทางการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก อิทธิพลของสนามแม่เหล็กจะทำให้อนุภาคประจุนั้นเคลื่อนที่ในแนววงกลม ดังรูปที่ 2.4 ด้วยรัศมี

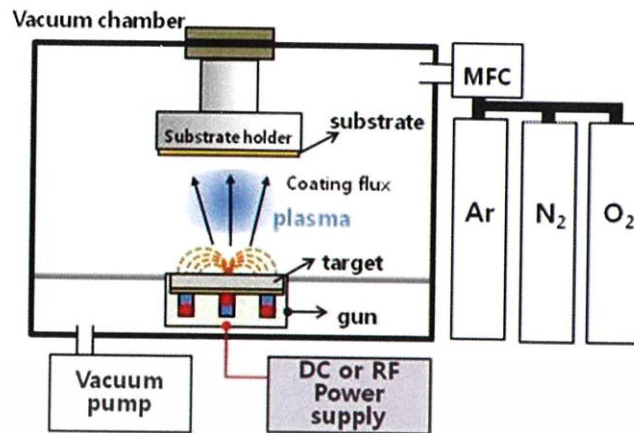


รูปที่ 2.5 ระบบเคลือบแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอร์ริง

2.2.3 ระบบเคลือบแบบรีแอคทีฟสปีดเตอร์ริง

รีแอคทีฟสปีดเตอร์ริงเป็นระบบที่เกิดขึ้นเมื่อใส่แก๊สไวกรียา เช่น ออกซิเจนหรือไนโตรเจนเข้าไปในแชมเบอร์เพื่อสร้างฟิล์มบางสารประกอบตระกูลออกไซด์และไนไตรด์ได้ ซึ่งระบบนี้ใช้ได้ทั้งระบบดีซีและอาร์เอฟสปีดเตอร์ริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

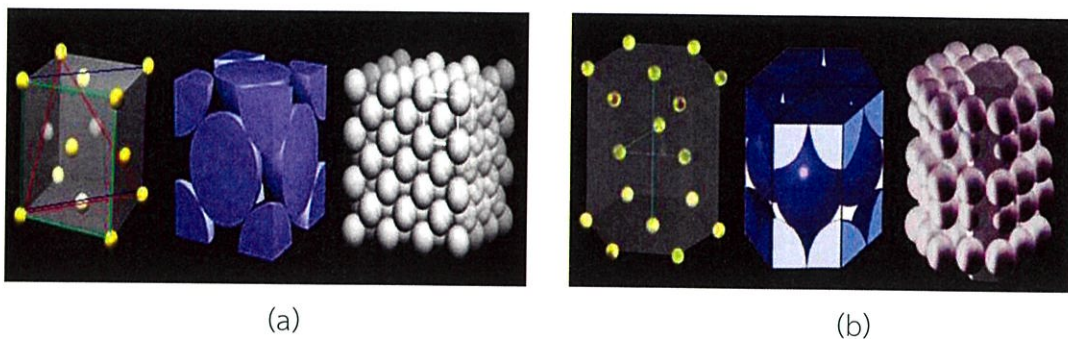


รูปที่ 2.6 ระบบเคลือบแบบสปัตเตอร์ที่ฟลัดเตอริง

2.3 สมบัติของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์เป็นที่นิยมในการเคลือบลงบนชิ้นงานที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์จะช่วยให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์และเครื่องจักรยาวนานยิ่งขึ้น เนื่องจาก ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์มีค่าความแข็งสูงประมาณ 20-25 GPa ยึดเกาะกับผิวโลหะและทนต่อการขีดสี หน่ออุณหภูมิสูง และ ด้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงได้ดี อีกทั้งมีค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานต่ำ การเตรียมฟิล์มโครเมียมไนไตรด์ มีหลายวิธีเช่น การเคลือบด้วย วิธีระเหยสาร (Evaporation) หรือ วิธีคาโทดิกอาร์ค แต่ที่นิยมใช้กันใน ภาคอุตสาหกรรมคือการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์ที่ฟลัดเตอริง (reactive DC magnetron sputtering)

โดยทั่วไปอาจจะพบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ได้ 2 ลักษณะ คือ CrN และ Cr₂N มีการจัดเรียงโครงสร้างของผลึกที่แตกต่างกัน Cr₂N จะมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกแบบ Hexagonal close-packed (hcp) แต่ในขณะเดียวกัน CrN จะมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างของผลึกแบบ Face-centred cubic (fcc) ค่าคงที่ผลึกของ Cr_xN_y จะมีประมาณ 4.10 อังสตรอม การจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกจะมีผลต่อฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ คือ ฟิล์มโครเมียมไนไตรด์ที่มีโครงสร้างแบบ Cr₂N จะมีความแข็งแรงกว่า และมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงกว่า แต่จะมีความต้านทานการสึกหรอต่ำกว่าฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่มีโครงสร้างแบบ CrN



รูปที่ 2.7 (a) การจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกแบบ fcc
(b) การจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกแบบ hcp

2.4 เทคนิคการวิเคราะห์ต่างๆ ที่ใช้ในโครงการวิจัย

2.4.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (x-ray diffraction)

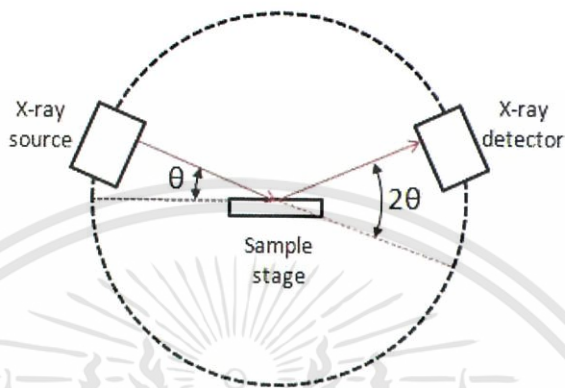
เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง ซึ่งในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้รูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะช่วยให้เราทราบว่า ในตัวอย่างนั้นมีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ของ XRD จะสามารถหองค์ประกอบของตัวอย่างได้แล้วนั้นยังสามารถคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่างคำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละ Unit cell ความเครียดของตัวอย่างค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังสามารถทำการวิเคราะห์หองค์ประกอบของฟิล์มบางและคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบาง โดยผลที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับ ฐานข้อมูลมาตรฐาน JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard)



รูปที่ 2.8 เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

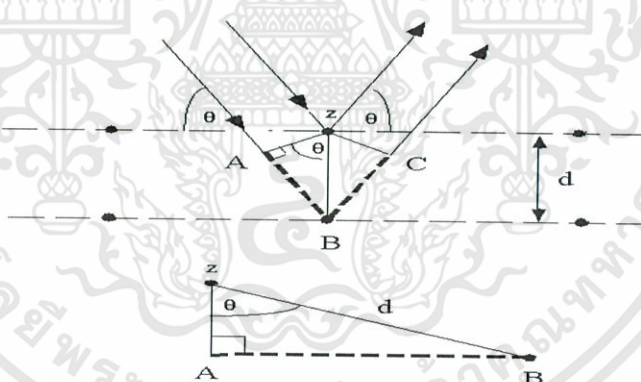
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อรังสีเอกซ์ถูกยิงตกกระทบระนาบของอะตอมภายในผลึกที่มุมตกกระทบ θ รังสีเอกซ์บางส่วนจะสะท้อนกลับ (การเลี้ยวเบน) ที่มุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ยิงผ่านชั้นผลึกที่อยู่ในตัวอย่างโดยจะใช้ Detector รับความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ดังรูป 2.9



รูปที่ 2.9 การทำงานของเครื่อง XRD

การพิสูจน์สมการของแบรกก์



รูปที่ 2.10 การพิสูจน์สมการแบรกก์

เมื่อรังสีตกกระทบทั้ง 2 ลำ มีเฟสตรงกันทำมุม θ กับระนาบ รังสีที่หนึ่งกระทบเข้ากับระนาบบน และสะท้อนออกมาทำมุม θ กับระนาบ ส่วนรังสีที่สองกระทบเข้ากับระนาบถัดไปและสะท้อนออกมาทำมุม θ กับระนาบที่สอง โดยรังสีที่สองจะเคลื่อนที่เป็นระยะทางเพิ่มขึ้น $AB + BC$ แทรกสอดกับคลื่นลำที่หนึ่ง ซึ่งคลื่นทั้งสองลำอาจจะแทรกสอดแบบเสริม หักล้าง หรือ แทรกสอดกันแบบไม่ตรงเฟสกันได้ แต่ถ้าจะให้มีการแทรกสอดแบบเสริมกัน ผลต่างของระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ขึ้นมา นั้น จะต้องเท่ากับ จำนวนเต็ม (n) คูณกับความยาวคลื่น ดังสมการต่อไปนี้

$$n\lambda = AB + BC \quad (2.1)$$

พิจารณาสามเหลี่ยมมุมฉาก ABZ จะได้สมการ

$$AB = d\sin\theta \quad (2.2)$$

เนื่องจาก $AB + BC$ ดังนั้น (2.2) จะเป็น

$$n\lambda = 2AB \quad (2.3)$$

แทนสมการ (2.2) ในสมการ (2.3) จะได้

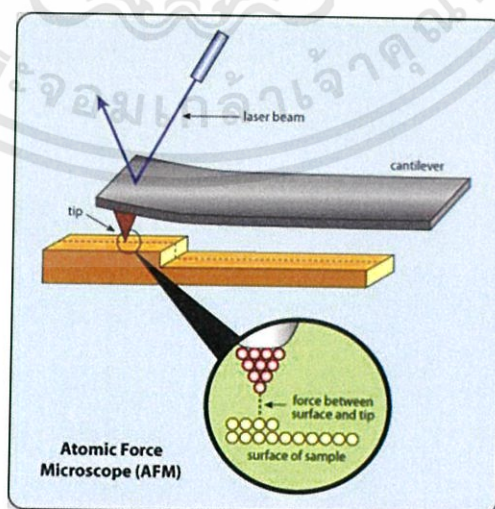
$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (2.4)$$

เมื่อ	d	คือ ระยะห่างระหว่างลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบบนระนาบ
	θ	คือ มุมที่ตกกระทบบ
	n	คือ เลขจำนวนเต็ม
	λ	คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

2.4.2 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy)

หลักการของเทคนิค Atomic Force Microscopy

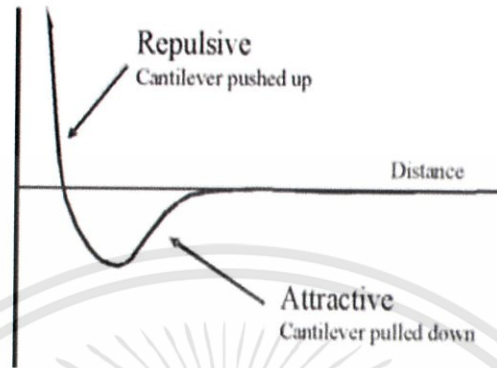
AFM เป็นเทคนิคประเภทหนึ่งในกลุ่มของ Scanning Probe Microscopy ซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถใช้ในการดูสภาพพื้นผิวของวัสดุประเภทต่างๆ ได้ โดยมีหลักการพื้นฐาน คือ การใช้เข็มตรวจวัดขนาดเล็ก (Probe Tip) ที่ทำจากวัสดุ Silicon nitride (Si_3N_4) เคลื่อนที่สแกน (Scanning) ไปทั่วบริเวณต่างๆ ของผิววัสดุ โดยการควบคุมของตัว Piezoelectric Scanner ซึ่งสภาพผิวของวัสดุที่แตกต่างกันไป จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกับเข็มตรวจวัด (Probe Tip) แตกต่างกันไป จึงทำให้ได้ภาพที่ออกมาสอดคล้องตามสภาพพื้นผิวในแต่ละบริเวณ



รูปที่ 2.11 แสดงองค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Scanning Probe Microscope ในแบบ AFM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

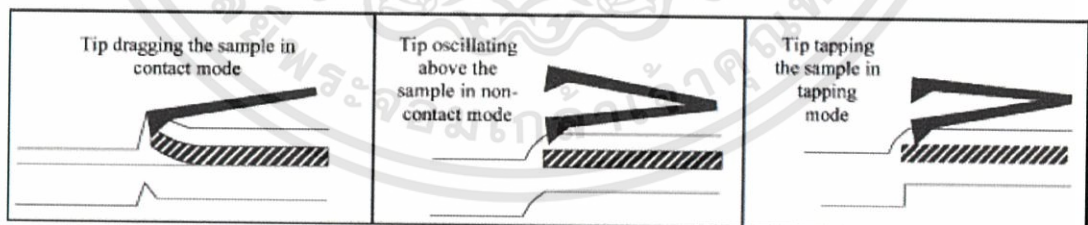
สำหรับในเทคนิคแบบ AFM ที่จะกล่าวถึงในที่นี้ สิ่งที่ทำให้คานที่มีเข็มเกาะอยู่ เกิดการโค้งงอขึ้นก็คือ แรงกระทำระหว่างอะตอม ซึ่งอาจจะเป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลัก ก็ได้ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเข็มปลายแหลม (Tip)



รูปที่ 2.12 ลักษณะของแรงกระทำระหว่างอะตอมที่เกิดขึ้นในระยะห่างระหว่างวัตถุต่างๆ กัน

เครื่องมือ Atomic Force Microscope ซึ่งจากภาพบริเวณตรงกลางก็คือบริเวณที่จะใช้วางชิ้นงานและก็เป็นบริเวณที่จะมีเข็มวัด (Probe Tip) วางอยู่ด้วย ส่วนที่บริเวณด้านบนของเครื่องมือจะมีกล้อง Video Microscope ติดตั้งไว้ เพื่อใช้สำหรับดูตำแหน่งของเข็มที่จะทำการวางลงบนบริเวณต่างๆ บนผิว ส่วนภาพที่เกิดขึ้นจากกล้องจะแสดงออกมาทางจอทีวี นอกจากนี้ทางด้านบนยังมีแหล่งให้กำเนิดแสงเลเซอร์ ที่จะใช้สำหรับเป็นตัวบอกตำแหน่งของเข็มที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการเคลื่อนที่

AFM จะสามารถศึกษาได้อย่างน้อย 3 รูปแบบ



(a)

(b)

(c)

รูปที่ 2.13 แสดงภาพที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของเข็มปลายแหลมไปบนผิวงาน

(a) เทคนิคแบบ Contact mode

(b) เทคนิคแบบ Non-Contact mode

(c) เทคนิคแบบ Tapping mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) Contact mode

เป็นการวัดรูปทรงของสภาพผิวชิ้นงาน (Topography) โดยการขยับให้เข็มไถล (Slide) ไปบนผิวงานซึ่งจะทำให้มีแรงผลักเกิดขึ้น เนื่องจากว่า เข็มกับผิวงานจะอยู่ใกล้กันมาก (ประมาณ 1-2 Angstrom) ซึ่งแรงผลัสดังกล่าวนี้ จะเปลี่ยนแปลงไปตามรูปทรงของผิวงาน ซึ่งจะทำให้มีการโค้งงอ (Deflection) ของคาน (Cantilever) ที่มีเข็มยึดเกาะอยู่ที่ปลาย โดยมีขนาดของการเปลี่ยนแปลงสอดคล้องเป็นไปตามลักษณะรูปทรงของผิวงาน

อย่างไรก็ตาม เทคนิคแบบ Contact Mode นี้จะมีข้อเสีย คือ ในการที่จะลากให้เข็มตรวจวัดเคลื่อนที่ไถลเข้าไปยังบริเวณต่างๆ บนผิวงาน อาจจะทำให้เกิดตำหนิ หรือสภาพพื้นผิววัสดุที่ต่างไปจากสภาพเดิมที่แท้จริง (Artifact) และความเสียหายเกิดขึ้นแก่ผิวงานได้ ยกตัวอย่างเช่น ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติ ที่ซึ่งมีอากาศและความชื้นในอากาศ จะเกิดหยดน้ำหรือสิ่งสกปรกติดอยู่บนผิวงาน ซึ่งเมื่อเกิดการเคลื่อนที่สแกนของเข็มวัดไปสัมผัสกับผิวที่มีชั้นบางๆ ของหยดน้ำ และสิ่งสกปรกดังกล่าวเกาะอยู่ จะทำให้มีแรงดึง (แรงไฟฟ้าสถิตย์ และแรงตึงผิว) ดึงให้ตัวคานที่มีเข็มยึดอยู่ที่ปลายเคลื่อนที่ลงมาสัมผัสกับชั้นดังกล่าว ทำให้ผลต่อค่าแรงระหว่างเข็มกับผิวงานที่เกิดขึ้นโดยรวมเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ ยังทำให้ผิวงานถูกทำลาย เช่น การฉีกขาด จากการลากเข็มไปบนผิวงาน

2) Non-Contact mode

เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวข้างต้น จึงได้มีการพัฒนาเทคนิคแบบ Non-Contact mode ขึ้นมา โดยในที่นี้ ตัวเข็มปลายแหลม จะถูกยกขึ้นมาให้มีระยะห่างเหนือผิวงานสูงมากขึ้น คือ ประมาณ 10-100 Angstrom จึงไม่มีปัญหาเรื่องการทำลายโครงสร้างผิวงาน โดยในกรณีนี้ แรงกระทำระหว่างตัวคานที่มีเข็มปลายแหลมยึดเกาะอยู่กับผิวงาน จะเป็นลักษณะแรงดึงดูด ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามรูปทรงของสภาพผิวงาน เช่นเดียวกัน

อย่างไรก็ตาม วิธีนี้จะมีข้อจำกัดที่เกี่ยวกับความละเอียดของภาพที่เกิดขึ้น นั่นคือ แรงดึงดูดประเภท Van der Waals ที่เกิดขึ้นระหว่าง tip กับ surface ในกรณีนี้ จะเป็นแรงที่อ่อนกว่าเมื่อเทียบกับแรงผลัสดังกล่าวที่เกิดขึ้นในกรณีของ Contact Mode ดังนั้น สัญญาณการเปลี่ยนแปลงจึงอาจจะไว (Sensitive) ต่อสิ่งแปลกปลอมที่อยู่บนผิวงาน อย่างเช่น หยดน้ำที่เกาะอยู่บนผิว

3) Tapping Mode

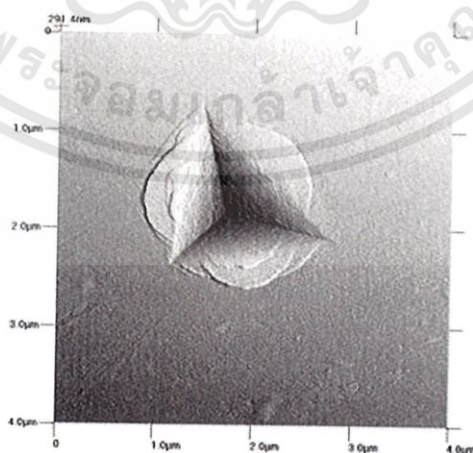
Tapping Mode เป็นเทคนิคที่รวมเอาลักษณะของการวัดทั้งในแบบของ Contact mode และ Non-Contact mode เข้าด้วยกัน กล่าวคือ ยังคงให้มีการสัมผัสกันระหว่างเข็มกับผิวงานในระยะที่ใกล้กันมาก เหมือนกับกรณีของ Contact Mode เพื่อให้เกิดภาพที่ชัดเจน ในขณะที่เดียวกัน ก็ยังมีการสั่นหรือขยับเข็มปลายแหลมให้เคลื่อนที่ขึ้นลงไปพร้อมๆ กับการเคลื่อนที่สแกนไปยังบริเวณต่างๆ บนผิวงาน ดังนั้น จึงเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาการลากไถลเข็มปลายแหลม ซึ่งจะทำให้เกิดการทำลายสภาพของผิวงานได้ ดังที่เคยเป็นปัญหาใน Contact Mode

2.4.3 เทคนิค Nano Indentation Hardness

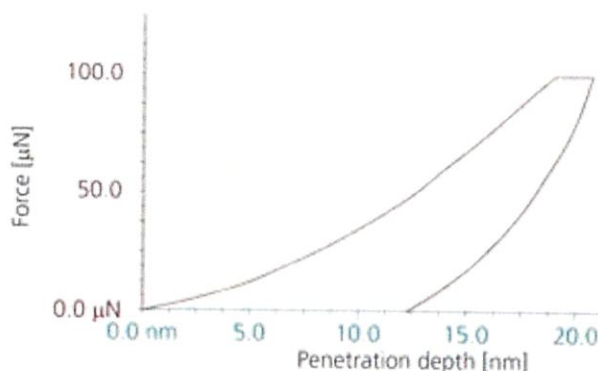
ความแข็งเป็นการแสดงสมบัติของวัสดุที่บ่งบอกถึงความต้านทานในการเกิดรอยกดที่พื้นผิว โดยการทดสอบความแข็งส่วนใหญ่เป็นการวัดแรงที่กระทำเทียบับรอยกดที่เกิดขึ้นจากแรงที่กระทำนั้นด้วยกระบวนการเคลื่อนหัวกดบนวัสดุ ซึ่งเป็นการทดสอบความแข็งแบบรอยกด โดยใช้เป็นหลักการพื้นฐานของเครื่องมือวัดความแข็งแบบต่างๆ หัวกดมีทั้งที่เป็นแบบหัวบอล แบบระนาบ, แบบกรวยปลายมนหรือปิรามิด ซึ่งปกติทำจากเหล็กกล้าแข็งหรือเพชรและใช้ทดสอบภายใต้สภาวะน้ำหนักคงที่ โดยการวัดน้ำหนักที่จะทำให้เกิดรอยกดตามที่กำหนดหรือวัดรอยกดที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำนั้น ในการทดสอบความแข็งบางครั้งต้องทำการทดสอบกับวัสดุที่เล็กและบางมาก หรือวัสดุที่มีระดับความแข็งแตกต่างกันที่พื้นผิวเป็นบริเวณแคบๆ จึงจำเป็นต้องพัฒนาเครื่องทดสอบความแข็งระดับนาโน

การทดสอบความแข็งระดับนาโนแบบรอยกด (Nano-Indentation) เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งตามตำแหน่งต่างๆ ภายในระยะทางที่สั้นมาก การใช้หัวกดทดสอบความแข็งตามปกติ อาทิเช่น ร็อคเวลล์หรือวิกเกอร์ส จะทำให้ได้รอยกดขนาดใหญ่เกินไป ด้วยสาเหตุนี้จึงมีการพัฒนาเครื่องทดสอบความแข็งที่สามารถใช้น้ำหนักเบามาก (น้อยกว่า 1 กิโลกรัม) กดลงบนหัวกดขนาดเล็กที่มีมิติเที่ยงตรงสูงเพื่อให้ได้รอยกดที่เล็ก ซึ่งขนาดของรอยกดบนชิ้นงานจะสัมพันธ์กับแรงกดของหัวกด พื้นผิวสัมผัสของรอยกดในการทดสอบความแข็งระดับนาโน ขนาดของรอยกดจะมีขนาดเล็กเพียงไม่กี่ไมครอน และความหนาของผิวชิ้นงานจะมีผลต่อการเลือกใช้หัวกด โดยรูปทรงเรขาคณิตของหัวกดสามารถกำหนดขนาดและพื้นที่ผิวสัมผัสได้

การทดสอบความแข็งในระดับนาโน (Nano indentation test) จะถูกนำไปคำนวณ เพื่อแปลงไปเป็นสมบัติของวัสดุอย่างอื่นที่ไม่สามารถตรวจวัดได้โดยตรง อาทิเช่น ค่าความยืดหยุ่นหรือค่าความเค้นจุดครากของชั้นฟิล์มบาง เป็นต้น เมื่อเริ่มทำการทดสอบจะป้อนแรงที่ใช้สำหรับกรกดด้วยอัตราการกดคงที่ จนกระทั่งถึงจุดที่กำหนด เมื่อป้อนแรงกดถึงจุดที่กำหนดจะกดค้างอยู่ประมาณ 2-3 วินาที แล้วถอนแรงกดออกด้วยอัตราเดียวกับแรงที่ใช้ในการกด ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของแรงกด (Force) กับความลึกของหัวกด (Indentation depth)



รูปที่ 2.14 รอยกดจากการทดสอบ



รูปที่ 2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะความลึกกับแรง

การใช้แรงกดผ่านหัวกดลงบนผิวของวัสดุ ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและเกิดรอยกดลึกลงไปในตัววัสดุเมื่อมีแรงมากระทำ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า เส้นโค้งการกระจัดของโพลิต (Load-displacement curves) นอกจากทดสอบหาค่าความแข็งของฟิล์มบางแล้วยังสามารถหาค่าความยืดหยุ่น (Elastic modulus) ได้จากความชันของกราฟในขณะถอดแรงกดออกเส้นโค้งการของโพลิตยังสามารถใช้อธิบายลักษณะความแตกต่างของวัสดุที่นำมาทดสอบได้

การหาค่าความยืดหยุ่น (Elastic modulus) สามารถหาได้จากสมการของ Poisson's ratio

$$\nu_{yx} = -\frac{\epsilon_t}{\epsilon_l} \quad (2.5)$$

เมื่อ ν_{yx} คือ อัตราส่วนของปัวซอง
 ϵ_t คือ ความเครียดตามขวาง
 ϵ_l คือ ความเครียดตามแนวแรง

ลักษณะเส้นโค้งการกระจัดของโพลิตจะเริ่มจากศูนย์ค่อยๆ เพิ่มแรงที่ใช้กดมากขึ้นจนถึงแรงสูงสุดที่กำหนดและถอนแรงกดออกกลับไปที่ศูนย์เหมือนเดิม พบว่าเส้นโค้งการจัดการกระจัดของโพลิตในวัสดุแต่ละชนิดไม่เหมือนกัน ในวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงเส้นโค้งการกระจัดของโพลิตจะทับหรือใกล้เคียงรอยเดิม ทำให้รูปร่างรอยกดกลับสู่สภาพเดิมหรือมีการสูญเสียรูปร่างเล็กน้อย แต่ในวัสดุเปลี่ยนแปลงกับรูปร่างไปเหมือนกับหัวกดที่ใช้ในการทดสอบ เส้นโค้งการกระจัดของโพลิตมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง เนื่องจากวัสดุนั้นมีรอยแตกหรือกดผ่านระนาบของวัสดุที่มีความแข็งต่างกัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อความลึกของรอยกดกระทันหัน

ซึ่งการทดสอบความแข็งหั่วกดแบบ Berkovich โดยทั่วไปจะใช้ในการวัดชิ้นงานในระดับสเกลเล็กๆ จะนิยมใช้ในการวัดความแข็งของวัสดุระดับนาโน เพราะว่าผลที่ได้จะทำให้ได้รอยกดที่มีขอบชัดเจน ดังนั้นในการวัดแบบนี้จะสามารถควบคุมความแม่นยำในการวัดได้ ค่าแรงกดของหั่วกดจะมีค่าที่แน่นอนและทำให้สามารถคำนวณค่าความลึกของรอยกดได้ ซึ่งก็คือค่า h_c ซึ่งสามารถคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของรอยกดได้จาก

$$A = 3\sqrt{3}h_c^2 \tan^2\theta \quad (2.6)$$

เมื่อกำหนดให้ $\theta = 65.03^\circ$ จะได้

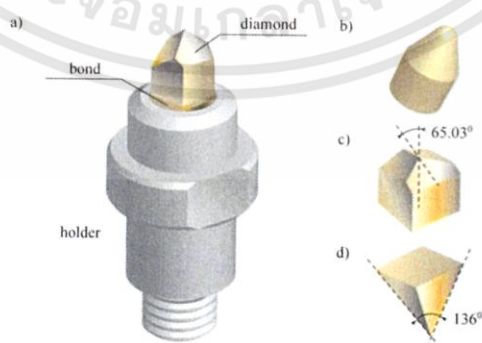
$$\begin{aligned} A &= 24.49h_c^2 \\ &\approx 24.5h_c^2 \end{aligned} \quad (2.7)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดของรอยกด (nm^2)
 h_c คือ ความลึกรอยกดของหั่วกด (nm)

และค่าความแข็งสามารถคำนวณได้จากแรงกดต่อพื้นที่หน้าตัดของรอยกด ซึ่งค่าความแข็งมีหน่วยเป็น kgf/mm^2 ($1 \text{ kgf}/\text{mm}^2 = 9.8 \times 10^{-3} \text{ GPa}$) แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$H = \frac{P}{24.5h_c^2} \quad (2.8)$$

เมื่อ H คือ ค่าความแข็ง (kgf/mm^2)
 P คือ แรงกด (Kgf)
 h_c คือ ความลึกรอยกดของหั่วกด (mm)

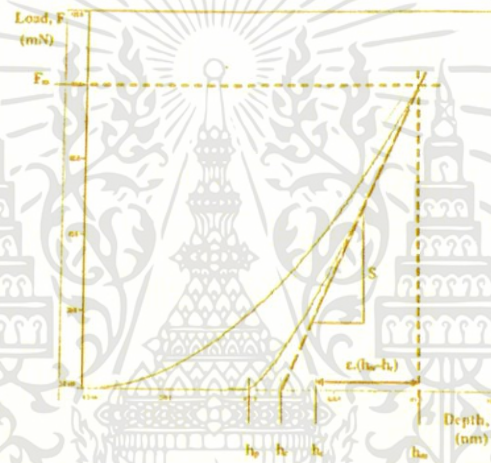


รูปที่ 2.16 หั่วกดแบบ Berkovich ใช้ทดสอบความแข็งแบบรอยกดระดับนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

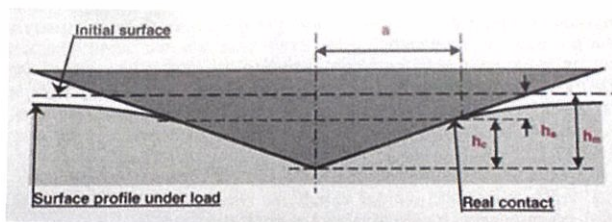
หัวกดแบบ Berkovich นั้นถูกออกแบบให้มีสัดส่วนของผิวหน้าและความลึกเหมือนกับหัวกดแบบวิกเกอร์สและจะมีองศาพื้นผิวกับเส้นศูนย์กลางเท่ากับ 65.03° ซึ่งการทดสอบวัสดุที่มีค่าความแข็งหลากหลายแตกต่างกันจะทำการปรับน้ำหนักที่ใช้กด ซึ่งในการทดสอบความแข็งแบบนาโนนั้น น้ำหนักกดที่ใช้เพียงไม่กี่มิลลิกรัมและการทดสอบวัสดุที่มีความแข็งสูงจะใช้น้ำหนักกดมากเพื่อให้ได้รอยกดที่ใหญ่พอจะตรวจวัดความลึกของรอยกดได้อย่างแม่นยำ ในทางกลับกันหากวัสดุอ่อนข้างอ่อนจะต้องเลือกใช้น้ำหนักกดที่น้อยเพื่อป้องกันไม่ให้อัตราการจมลึกเกินไปในชิ้นงานมากเกินไป

การวิเคราะห์จากเส้น lode ในขั้นต้นหัวกดจะติดกับผิวหน้าและกดลงในเนื้อวัสดุจนกว่าจะได้รับความลึกตามที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งตอนนี้จะทำให้ได้โหลดสูงสุด และเมื่อทำการถอนหัวกดออก โหลดจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งถึงศูนย์ ในการทำการจะหลีกเลี่ยงไม่ให้อัตราการสัมผัสตัววัสดุรองรับ การกำหนดความลึกของหัวกดไม่ควรให้เกิน 10% ของความหนาของฟิล์มบาง



รูปที่ 2.17 เส้น load ที่ตอนกดหัวกดและตอนปลดออก

ภาพดังต่อไปนี้แสดงการตอบสนองของการยืดหยุ่นของวัสดุที่เป็นพลาสติก ในระหว่างการกดด้วยปลายหัวกด Berkovich จากภาพ h_c ซึ่งคือความลึกของรอยกดที่ถูกกำหนดความลึกเมื่อทำการเจาะลงไปชิ้นงาน



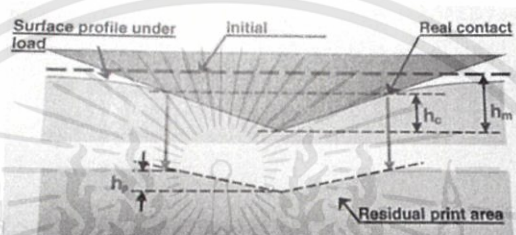
รูปที่ 2.18 แผนภาพแสดงของกระบวนการกด และการยุบตัวลงที่เกิดขึ้นในระหว่างการกดหัวกด

ในระหว่างการทดสอบ ซึ่ง h คือ ความลึกจากการวัด ดังความสัมพันธ์

$$h = h_s + h_c \quad (2.9)$$

เมื่อ h_s คือ การแทนที่ของพื้นผิวที่ขอบของการสัมผัส
 h_c คือ ระยะทางแนวตั้งที่ทำการสัมผัส ที่จุดสูงสุดของโหนด

โหนดและการคืนตัว คือ F_m และ h_m ตามลำดับ และรัศมีของวงกลมที่สัมผัส คือ a เมื่อถอนหัวกดและคืนสภาพแทนที่เนื่องจากความยืดหยุ่น สุดท้ายความลึกของรอยกดที่เหลืออยู่คือ h_f



รูปที่ 2.19 ภาพการเปลี่ยนแปลงของรอยกดที่แสดงพื้นที่การพิมพ์ที่เหลืออยู่หลังจากถอนหัวกด

การอธิบายเกี่ยวกับเส้นโค้งในการกำหนดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหัวกดกับชิ้นงาน ในวัสดุส่วนมาก พื้นที่การพิมพ์ที่เหลืออยู่คือค่าความใกล้เคียงที่ดีของพื้นที่ของการสัมผัส ความแข็ง เป็นการแสดงด้วยอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงของโหนดกับพื้นที่ผิวสัมผัสด้วยหลัก

$$H_{IT} = \frac{F_m}{A_p} \quad (2.10)$$

เมื่อ F_m คือ โหนดสูงสุด
 A_p คือ พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหัวกดและตัวอย่างที่ความลึกและโหนดสูงสุด F_m เป็นการวัดแบบง่าย ๆ (ตรวจสอบจากเส้นโค้งของ load/unload)
 H_{IT} คือ ค่าความแข็งที่ต้องการกำหนด

เครื่องมือวัดของ Young modulus

เมื่อค่า modulus ลดลง E_{IT}^* ใช้อธิบายสำหรับข้อเท็จจริงความยืดหยุ่นที่เกิดขึ้นในทั้งหัวกดและชิ้นงาน เครื่องมือวัดของ Young modulus ในวัสดุ E_{IT} คือคิดจาก E_{IT}^* ได้โดยใช้

$$\frac{1}{E_{IT}^*} = \frac{(1-\nu^2)}{E_{IT}} + \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} \quad (2.11)$$

เมื่อ ν คือ อัตราส่วนปัวซองสำหรับชิ้นงาน
 E_i และ ν_i คือ ความยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซอง ตามลำดับ ของหัวกด

ตามที่ Bulychev และ Shorshorov ที่การลดลงของความยืดหยุ่น สามารถเกี่ยวข้องกับการวัดความแข็ง S โดยความสัมพันธ์

$$E_{IT}^* = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{S}{\sqrt{A_p}} \quad (2.12)$$

เมื่อทราบค่า S และ A_p แล้วนั้น ค่า E_{IT}^* ก็สามารถหาได้ ดังนั้นค่า E_{IT} กำหนดจากความสัมพันธ์

$$E_{IT} = \frac{(1-\nu^2)}{\frac{1}{E_{IT}^*} - \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i}} \quad (2.13)$$

การกำหนดของค่าความแข็ง (S), ความลึกของรอบกด (h_c) และพื้นที่ผิวสัมผัสที่คาดการณ์ไว้ (A_p) โดยการวิเคราะห์ของเส้นโค้ง load/unload เริ่มจากรามีการเข้าถึง h_m และ F_m

- กระบวนการของ Oliver-Pharr เริ่มต้นโดย unload ที่เหมาะสมส่วนของข้อมูลที่แทนที่โหลดถึงพลังงานที่ต่ำโดยความสัมพันธ์

$$F = B(h - h_p)^m \quad (2.14)$$

เมื่อ F คือ การประยุกต์เข้ากับโหลด
 $(h - h_p)$ คือ การขยายตัวที่แทนที่
 B และ m คือ ค่าคงที่ของวัสดุ สังเกตจากพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

ความแข็ง S คือกำหนดโดยความแตกต่างของสมการนี้ และประเมินจากการแทนที่ห้วงกสูงสุด

$$S = \left(\frac{dF}{dh}\right)_{h=h_m} = B \cdot m \cdot (h_m - h_p)^{m-1} \quad (2.15)$$

จากกราฟ S คือสโลปที่เกิดจากเส้นที่ลากสัมผัสกับเส้นโค้งของโพลิตอนที่ถอนห้วงกออก

หนึ่งนำเสนอตัวเองในการคำนวณความลึกของสัมผัส h_c ที่โพลิตสูงสุดและความลึก สำหรับวัสดุที่ต้องใช้รูปร่างของห้วงกที่แน่นอน ในตัวอย่างนี้ h_c ได้จาก

$$h_c = h_m - h_s \quad (2.16)$$

ซึ่ง h_m คือกำหนดโดยการทดลอง พบว่า h_c, h_s เป็นสิ่งจำเป็น ตามที่ Sneddon เสนอไว้ h_s สามารถเขียนเป็น

$$h_s = \left(\frac{\pi-2}{\pi}\right) (h_m - h_p) \quad (2.17)$$

ที่ปริมาณ $(h_m - h_p)$ สามารถเขียนเป็น

$$h_m - h_p = 2 \frac{F_m}{S} \quad (2.18)$$

จากสมการ (2.14) สมการที่ได้ออกมาคือ

$$h_s = \varepsilon \frac{F_m}{S} \quad (2.19)$$

สุดท้ายแล้ว

$$h_c = h_m - \varepsilon \frac{F_m}{S} \quad (2.20)$$

สำหรับห้วงกในอุดมคติ สูตร area function คือ

$$A_p \equiv C_0 h_c^2 \quad (2.21)$$

สามารถใช้หา การประมาณการครั้งแรกของพื้นที่สัมผัส เป็นค่าคงที่ C_0 ที่ขึ้นอยู่กับ รูปทรงเรขาคณิตของห้วงก ($C_0 = 24.5$ สำหรับห้วงกแบบ Berkovich และ 6.3 สำหรับห้วงกมุลูกบาศก์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตาม ปลายของหัวกดไม่ได้มีรูปทรงที่แน่นอนตลอดไป พื้นที่สัมผัสที่ได้จึงมีขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ซึ่งพิจารณาโดยใช้ฟังก์ชันทั่วไปเนื่องจากการลดลงของปลาย เขียนได้จาก

$$A_p = C_0 h_c^2 + C_1 h_c + C_2 h_c^{1/2} + \dots + C_8 h_c^{1/128} \quad (2.22)$$

ซึ่งค่าคงที่ C_0, \dots, C_8 สามารถกำหนดจากข้อมูลของเครื่องมือวัดซึ่งส่วนใหญ่เป็นปริมาณสเกลาร์และวิธีการสรุปโดย Oliver และ Pharr (อธิบายใน “การวัดขนาด Area function”) ฟังก์ชันเต็มนี้เป็นสิ่งสำคัญถ้ารายละเอียดของค่า E_{IT} และ H_{IT} ต้องกำหนดไว้ค่า The Martens hardness (MS) คือค่ากำหนดให้เป็นโหลดสูงสุดที่นำไปใช้ F_m ค่าเฉลี่ยของพื้นที่สัมผัส A_p ที่โหลด

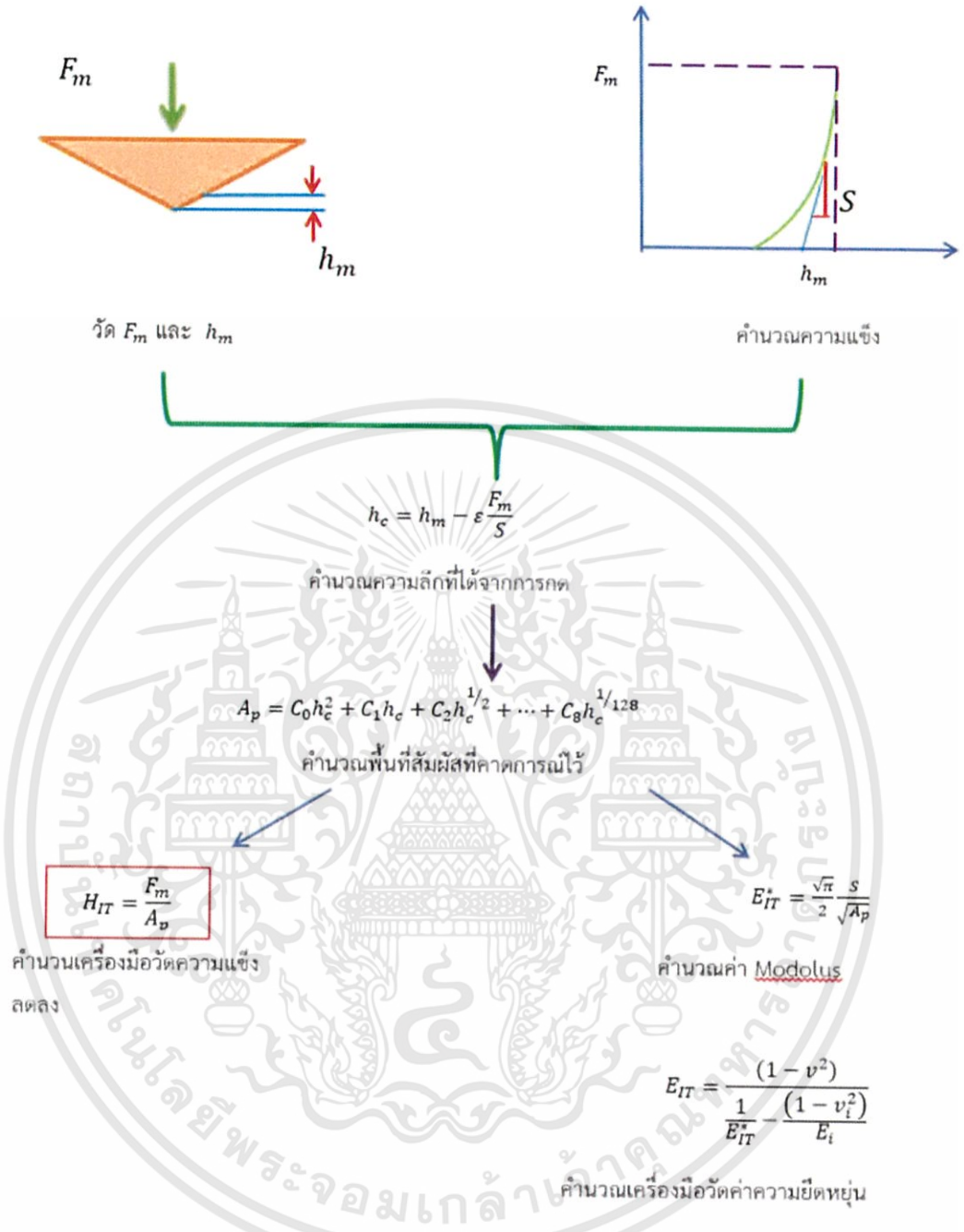
$$HM = \frac{F_m}{A_p} \quad (2.23)$$

The Martens hardness คือค่าที่กำหนดไว้สำหรับหัวกดทรงแบบ Vickers และ Berovich ที่เป็นทรงเรขาคณิต ที่ไม่ใช่หัวกดทรงวงกลมหรือ หัวกดแบบ Knoop นอกจากนี้มันยังได้รับการเรียกว่าเป็น Universal hardness สำหรับหัวกดแบบ Berovich ที่สมบูรณ์ The Martens hardness กำหนดโดย

$$HM = \frac{F}{A_p(h)} \approx \frac{F}{26.43} \quad (2.24)$$

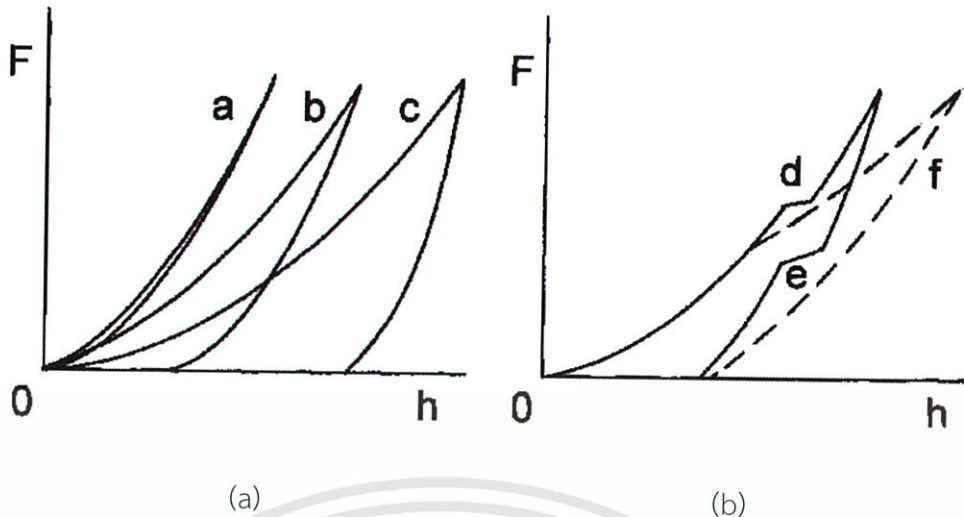
$$A_p(h) = \frac{3 \cdot \sqrt{3 \cdot \tan(a)}}{\cos(a)} \cdot h^2 \quad (2.25)$$

พารามิเตอร์กล่าวถึงหน้ามุมของหัวกด (65.03° ในกรณีนี้) และ h คือความลึกที่ได้จากการเจาะ



รูปที่ 2.20 แผนภาพสรุปการคำนวณที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค Nano-Indentation Hardness

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 แผนภาพแสดงตัวอย่างเส้นโค้งของโพลตระหว่างแรงและความลึกของหัวกด ของวัสดุเป็น elastic - plastic ซึ่งมีลักษณะดังต่อไปนี้

(a) a คือ วัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง, b คือ วัสดุ elastoplastic แบบแข็ง, c คือ วัสดุ elastoplastic แบบอ่อน

(b) d คือ รอยแตกที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดแรงกด, e คือ การเปลี่ยนเฟสในระหว่างการปลดแรงออก และ f คือ การแยกตัวแบบพื้นเลื้อยของสารที่เคลือบลงบนพื้นผิว

โดยทั่วไปจะแบ่งประเภทของการเปลี่ยนรูปของโลหะหรือของวัสดุออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

- 1) การเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติก (Elastic Deformation) เป็นขบวนการเปลี่ยนรูป หรือการแปรรูปแบบยืดหยุ่น คือวัสดุเมื่อมีแรงมากกระทำในช่วงช่วงหนึ่งที่วัสดุนั้นๆ สามารถทนได้อยู่ได้ โดยเมื่อเราเอาแรงหรือปลดแรงนั้นออก วัสดุนั้นๆ ก็จะสามารถกลับคืนรูปให้อยู่ในสภาพเดิมได้
- 2) การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) เป็นขบวนการเปลี่ยนรูปหรือการแปรรูปแบบถาวร คือวัสดุเมื่อมีแรงมากกระทำจนถึงจุดเกินพิกัดที่จะสามารถทนอยู่ในสภาพนั้นๆ ได้อีกจนถึงขนาดเกิดการเปลี่ยนแปลง ขนาดและรูปร่างไปอย่างถาวร จนไม่อาจจะกลับคืนสู่สภาพเดิมได้

กลไกในขบวนการเปลี่ยนรูป ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Permanent Deformation) ซึ่งมักจะเกิดจากการที่วัสดุได้รับแรงมากกระทำจนเกิดการเปลี่ยนแปลงชนิดรุนแรง ถึงแม้ว่าเราจะเอาแรงนั้นออกแล้วก็ตาม มันก็ไม่สามารถจะกลับคืนสู่ในสภาพเดิมได้

- 1) สลิป (Slip Deformation) คือ การเลื่อนตัว หรือการเลื่อนผ่านกันระหว่างผลึกในแนวของอะตอม (Atom) ในระนาบ (Planes) ของผลึก โดยเป็นการเคลื่อนย้ายชนิดแบบถาวร โดยที่ ถึงแม้ว่าจะไม่มี ความเค้นใดๆ แต่ผลึกนั้นๆ ก็ไม่สามารถเคลื่อนกลับมาให้อยู่ในสภาพดั้งเดิมได้อีกเลย
- 2) ทวินนิ่ง (Twinning Deformation) หมายถึงขบวนการในการเปลี่ยนรูป อันเนื่องมาจากระยะหรือ แนวของผลึกเกิดการถูกเฉือน ให้แบ่งแยกออกเป็น 2 ส่วนที่มีลักษณะคล้ายกัน หรือเหมือนกันโดยที่ ทิศทางการหักเหจะเป็นไปทั้งระนาบเลยทีเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) ดิสโลเคชัน (Dislocation) คือขบวนการที่เกิดการคลาดเคลื่อนของวัสดุเมื่อเกิดมีแรงหรือได้รับแรง มาจากภายนอกเข้ามากระทำจนกระทั่งอะตอมเกิดอาการเลื่อนตัวขึ้นนั่นเอง

ความแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์วัสดุที่มีความยืดหยุ่นเชิงเส้น (elastic) กับวัสดุที่ยืดหยุ่นไม่เชิงเส้น (inelastic) คือ วัสดุที่มีความยืดหยุ่นเชิงเส้นผลรวมของความเค้นที่เกิดขึ้นสามารถหาความเครียดทั้งหมด แต่ถ้าเป็นวัสดุยืดหยุ่นไม่เชิงเส้น ความเค้นที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับความเค้นและความเครียด ณ เวลานั้นๆ โดยวัสดุที่มีพฤติกรรมยืดหยุ่นแบบไม่เชิงเส้น ได้แก่ วัสดุที่เป็น elasto-plastic, creep เป็นต้น โดยงานวิจัยนี้จะใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็น elasto-plastic โดยการพิจารณาจำเป็นต้องพึงทฤษฎีที่สำคัญ 3 ทฤษฎี คือ เงื่อนไขของการคราก (yield condition), กฎความแข็งเกร็ง (hardening rule), กฎของการไหล (flow rule) โดยทฤษฎีทั้ง 3 จะทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดในกรณีที่วัสดุอยู่ในช่วงที่เป็นพลาสติกได้

2.4.4 เทคนิค Tribology

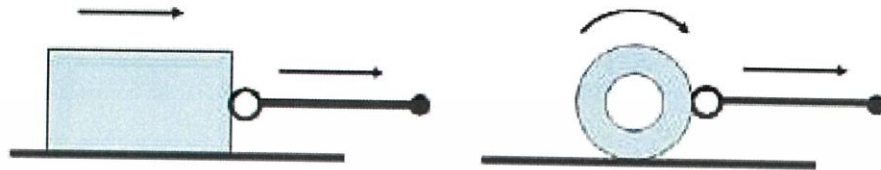
โทรโบโลยีเป็นสาขาวิชาที่ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของการสัมผัสกันระหว่าง 2 พื้นผิวสัมผัสที่มีปฏิกริยาต่อกัน และมีการเคลื่อนที่สัมผัสต่อกัน โดยหลักการเมื่อผิวสัมผัสมีการเคลื่อนที่ที่หลากหลายเช่น การลื่นไถล การกริ่งตัว การเคลื่อนที่แบบไปๆ กลับๆ เป็นต้น ทำให้เกิดปฏิกริยาในรูปแบบพลังงานทางกลและทางเคมี เมื่อเกิดความเร็วสัมผัสจะทำให้มีการเสียดทานขึ้น เมื่อเกิดการเสียดทานจะก่อให้เกิดการสูญเสียพลังงานในรูปแบบต่างๆ ดังนั้น จึงต้องมีการป้องกันโดยการใช้การหล่อลื่นหรือเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมในการใช้งานเพื่อป้องกัน หรือลดการเสียดทานและการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน ซึ่งปัญหาต่างๆ ของการสึกหรอมีผลทำให้เกิดการสูญเสียเงินตราจำนวนมากในงานอุตสาหกรรม ดังนั้นความรู้ทางด้านโทรโบโลยีจึงมีความสำคัญต่องานอุตสาหกรรมต่างๆ เพื่อมาปรับปรุงและพัฒนา ชิ้นส่วน เครื่องมือ และ อุปกรณ์ในงานอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพสูงสุด มีอายุการใช้งานที่นานขึ้น มีการซ่อมบำรุง น้อยลง และลดต้นทุนค่าใช้จ่ายน้อยลง ดังนั้นวิชาโทรโบโลยีจะมี 3 องค์ประกอบ ที่สำคัญและมีความสัมพันธ์ต่อกันและกันคือ การเสียดทาน (Friction) การหล่อลื่น (Lubrication) และการสึกหรอ (Wear)

2.4.4.1 ความเสียดทาน (Friction)

ความเสียดทานเป็นแรงต้านการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างผิว 2 ผิว ลักษณะของการเคลื่อนที่อาจเป็นการลื่นไถลหรือการกริ่ง ของผิวหนึ่งไปบนอีกผิวหนึ่งซึ่งอาจจะสัมผัสกัน โดยตรงหรือมีของเหลว หรือมีฟิล์มหรือมีฟิล์มกันอยู่ระหว่างผิวที่มีการเคลื่อนที่สัมผัส ปัญหาสำคัญของการเสียดทาน คือการที่มีการเสียดทานระหว่างผิววัสดุจะทำให้เกิดการสูญเสีย พลังงานของระบบเพื่อเอาชนะแรงเสียดทานหรือต้องใส่พลังงานให้กับระบบมากขึ้นเพื่อให้ระบบทำงานได้ การลดการเสียดทานในวิทยาการสมัยใหม่ทั้งในการเลือกวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความ เสียดทานต่ำ และการออกแบบระบบให้เกิดความเสียดทานขึ้นน้อยที่สุด รวมถึงการเลือกใช้สารหล่อลื่นจะช่วยในการลดและหลีกเลี่ยงการเกิดการสัมผัสกันในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเสียดทาน การเสียดทานสามารถแบ่งออกได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) การเสียดทานแบบลื่นไถล (Sliding Friction) คือการเสียดทานที่เกิดขึ้นจากการ เคลื่อนที่แบบ ลื่นไถล ระหว่างผิวสัมผัสที่ไม่มีการกลิ้ง
- 2) การเสียดทานแบบกลิ้ง (Rolling Friction) เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง ระหว่างชิ้นงานคู่ สัมผัสการเสียดทานแบบนี้คือ การเสียดทานที่เกิดในร่องลื่นแบบเม็ดลูกกลิ้ง



(a)

(b)

รูปที่ 2.22 (a) การเสียดทานแบบลื่นไถล

(b) การเสียดทานแบบ

- 3) การเสียดทานที่มีการลื่นไถลและการกลิ้งตัวผสมกัน (Combined Rolling & Sliding Friction) ลักษณะการสัมผัสแบบนี้เป็นการเคลื่อนที่ผสมกันระหว่างการลื่นไถลกับการกลิ้งตัว การเกิดแรงเสียดทานในการเคลื่อนที่แบบผสมนี้มีความสำคัญมากในการใช้งาน ชิ้นส่วนทางกลคือ ฟันเฟือง โดยเฉพาะฟันเฟืองตรง เนื่องจากเป็นไปไม่ได้ที่จะสามารถปกป้องหรือป้องกันไม่ให้เกิดการลื่นไถล ของผิวสัมผัสของฟันเฟืองที่เกิดขึ้นขณะมีการเคลื่อนที่ เนื่องจากการยุบตัวของชิ้นส่วนที่กลิ้งตัวและหน้าสัมผัส โดยการเกิดลักษณะนี้จะขึ้นอยู่กับชนิด ของวัสดุและภาระที่กระทำ
- 4) แรงเสียดทานสถิต (Static Friction) เป็นแรงเสียดทานซึ่งเกิดจากวัตถุ 2 ชนิดมา สัมผัสกัน พบว่า แรงเสียดทานที่เกิดจะมีค่าไม่คงที่ จะมีปริมาณเท่ากับแรงที่มากกระทำและจะมี ค่าสูงสุดเมื่อวัตถุเริ่มเคลื่อนที่
- 5) การเสียดทานจลน์ (Kinetic Friction) เป็นแรงเสียดทานที่เกิดกับผิวของวัตถุทั้ง 2 ชนิด ในขณะที่วัตถุเริ่มเคลื่อนที่

2.4.4.2 การหล่อลื่น (Lubrication)

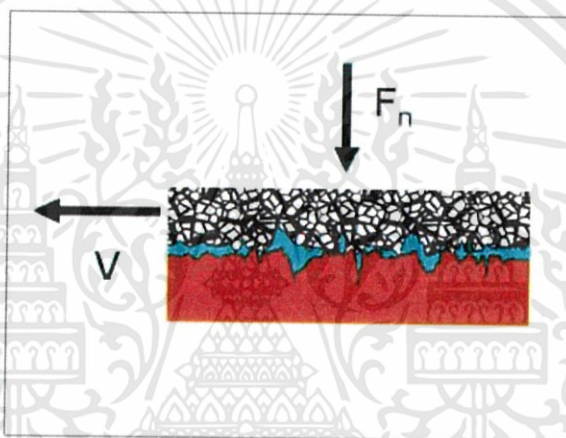
การหล่อลื่นที่ดีเป็นทั้งศาสตร์และเทคโนโลยีและศิลปะของการปฏิบัติงาน การหล่อลื่นที่ดี เกิดได้ด้วยการผสมผสานประสาน ในด้านความรู้ การอบรม การฝึกฝน การปฏิบัติ ทักษะคติที่ดี และ มุ่งมั่น โดยมีเป้าหมาย ในการทำการหล่อลื่นที่ดีและถูกต้องสามารถต่ออายุเครื่องจักรกล รวมถึง ชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องจักรกลให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน โดยเครื่องจักรกลส่วนใหญ่ ชิ้นส่วน ต่างๆ ต้องมีการเคลื่อนไหวที่จึงหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะต้องใช้น้ำมันหล่อลื่น เพื่อลดแรงเสียดทานและชะลอ การสึกหรอของเครื่องจักรกล

การแบ่งชนิดของร่องลื่นแบบกาทตามลักษณะการหล่อลื่นได้ดังนี้

- 1) การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก (Hydrodynamic Lubrication) หรือการหล่อลื่น แบบฟิล์มหนา (Thick-Film) คือการหล่อลื่นผิวสัมผัสของร่องลื่นด้วยน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนา เพียงพอที่จะป้องกันไม่ให้ผิวของโลหะสัมผัสกันได้ ความดันที่เกิดขึ้นภายในชั้นของ น้ำมันหล่อลื่นจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ช่วยในการรับแรงที่กระทำต่อร่องลื่น โดยที่การเคลื่อนที่ของผิวหน้าร่องลื่นจะดึง เอา น้ำมันหล่อลื่นเข้าไปในช่องรูปลิ้น ด้วยความเร็วที่สูงพอที่จะทำให้เกิดความดันเพื่อรับ
- 2) การหล่อลื่นแบบไฮโดรสแตติก (Hydrostatic Lubrication) คือการหล่อลื่นโดยการ การอัด ของไหลหล่อลื่นเข้าไปในร่องลื่นด้วยความดันสูงเพียงพอที่จะแยกผิวสัมผัสออกจากกันได้ โดยที่ ไม่ต้องให้มีการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างผิวสัมผัสของร่องลื่น
 - 3) การหล่อลื่นที่สามารถหล่อลื่นตัวเอง (Self-Lubrication) คือการแยกตัวระหว่าง หน้าสัมผัส ของเพลากับร่องลื่นไม่มีชั้นฟิล์มของสารหล่อลื่นแทรกอยู่โดยจะมีการใช้ผงสารหล่อ ลื่น ของแข็งในการหล่อลื่นเช่น แกรไฟต์ หรือโมลลิบดีนัมไดซัลไฟด์ เป็นต้น
 - 4) การหล่อลื่นชนิดไร้สารหล่อลื่น คือการหล่อลื่นแบบแห้งนี้ผิวสัมผัสของเพลากับ ร่องลื่นจะ สัมผัสกันโดยตรงจะมีผลทำให้เกิดการเสียหายหรือการสึกหรออย่างรุนแรงที่บน ผิวสัมผัสของ เพลากับร่องลื่น



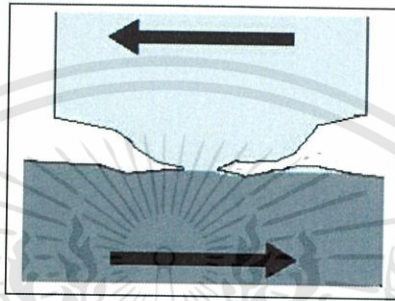
รูปที่ 2.23 การหล่อลื่นชนิดไร้สารหล่อลื่น

- 5) การหล่อลื่นแบบบาวนด์ (Boundary Lubrication) คือ สถานะของการหล่อลื่นที่ ทำให้ผิว ของร่องลื่นเกิดจากปฏิกิริยาเคมีหรือจากการดูดกลืนอะตอมทั้งเคมีและทางกายภาพ หรือ ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นไม่เพียงพอ แล้วความหนาของชั้นของน้ำมันหล่อลื่นจะลดลง ทำให้ ผิวสัมผัสเกิดฟิล์มหล่อลื่นซึ่งฟิล์มจะมีขนาดบางมาก ในระหว่างการขัดถูหรือการลื่นไหล ผิวหน้า ที่เกิดฟิล์มจึงทำหน้าที่ปกป้องเนื้อวัสดุที่สัมผัสกัน
- 6) การหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์ (Mixed Lubrication) คือการที่มีสารหล่อลื่นเพียง เล็กน้อยใน บริเวณที่มีการสัมผัสของผิววัสดุที่มีการเคลื่อนที่อยู่จะช่วยให้มีการปกป้องการ สัมผัสกัน โดยตรงของวัสดุที่สัมผัสกันโดยตรงทางกายภาพ
- 7) การหล่อลื่นด้วยแก๊ส โดยเป็นการหล่อลื่นในการใช้ก๊าซไหลด้วยตัวแรงดันผ่าน เข้าไปในช่อง แคบๆ ของร่องลื่นกับเพล่า และเกิดเป็นฟิล์มก๊าซหล่อลื่นแทรกอยู่ระหว่างร่องลื่นกับเพล่า

2.4.4.2 การสึกหรอ (Wear)

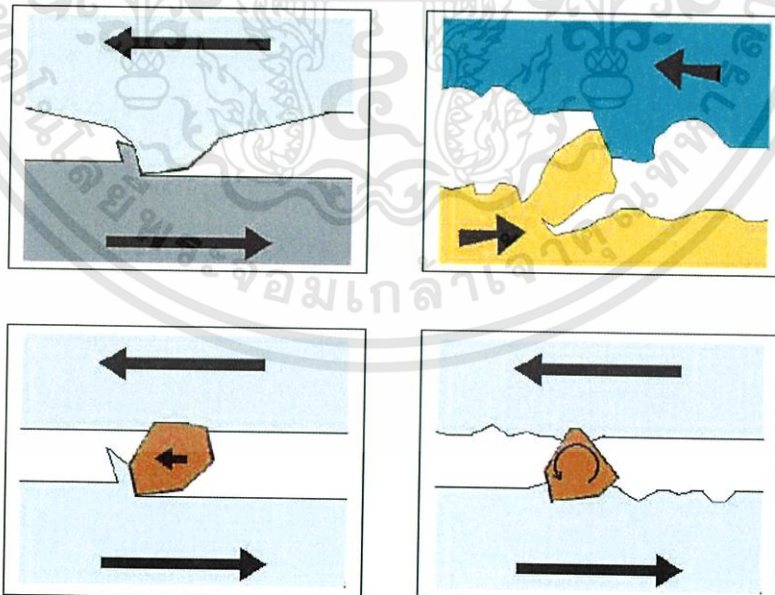
การสึกหรอหรือการเสื่อมสภาพ เป็นการเกิดการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนใดให้เกิดความเร็วสัมพัทธ์กับอีกชิ้นส่วนหนึ่งจะเกิดการเสียดทานขึ้น กลไกการสึกหรอหลักแบ่งได้ 4 ประเภท

- 1) การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear) เป็นกลไกการสึกหรอที่เกิดขึ้นจากการที่มีการเกิดพันธะยึดติดกันและมีการฉีกขาดตัวออกไปของพันธะที่เกิดขึ้น ในขณะที่ชิ้นงานการเคลื่อนที่ การเชื่อมติดกันเรียกกันว่า การเชื่อมเย็น (Cold Welded) การสึกหรอแบบนี้เกิดขึ้น เมื่อผิวสัมผัสของชิ้นส่วนอุปกรณ์หรือเสียดสีกันโดยมีหรือไม่มีสารหล่อลื่นก็ได้



รูปที่ 2.24 การสึกหรอแบบยึดติด

- 2) การสึกหรอแบบขูดขีด (Abrasive Wear) เป็นการสึกหรอที่เกิดขึ้นจากการที่เนื้อวัสดุถูกการตัดเฉือนออกไปจากการถูกขูดขีดโดยสารที่มีความแข็งแรงสูงมาก เช่น ฝุ่นละอองเม็ดทราย หรือเม็ดแร่ธาตุที่มีความแข็ง หลุดเข้าแทรกตัวอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล



รูปที่ 2.25 การสึกหรอแบบขูดขีด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

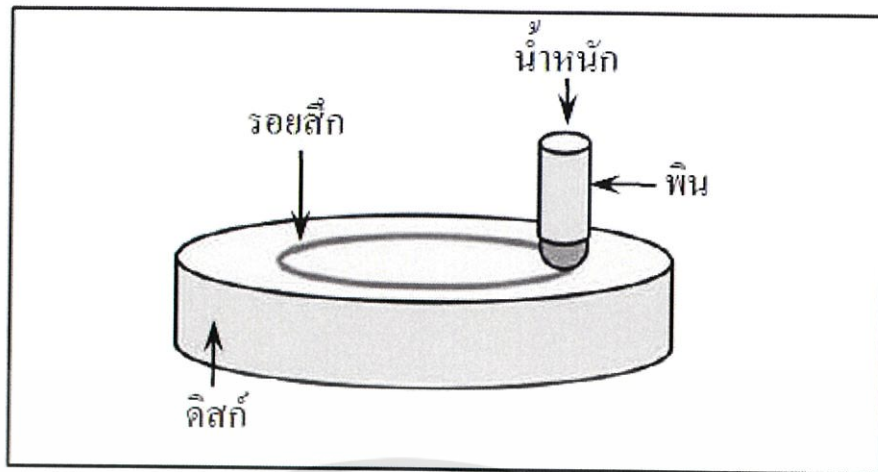
- 3) การสึกหรอเนื่องจากการล้าตัว (Fatigue Wear) การสึกหรอแบบนี้เป็นการสึกหรอที่เกิดขึ้นเนื่องจากการล้าตัวและเกิดรอยแตก หรือหลุมบนหน้าผิวหน้าวัสดุบริเวณที่มีการล้าตัว โดยมาจากชิ้นงานมีการรับภาระเป็นวงรอบ (Stress cycles) การล้าตัวของวัสดุจะมีโอกาส เกิดขึ้นน้อยมาก หากชิ้นงานรับภาระเพียงการกด (Compressive stress) หรือการดึง (Tensile stress) เพียงอย่างใดอย่างหนึ่งแต่จะมีโอกาสเกิดการล้าตัวมากกว่าที่มีการรับภาระสลับกันไปมาระหว่างการกดกับการดึง หรือรับภาระแบบเป็นวงกลม ลักษณะการล้าตัวอีกแบบหนึ่งเกิดจากการมีสิ่งสกปรกในสารหล่อลื่นและทำให้เกิดรอยกด (Dents) ขึ้นบนผิวชิ้นงานก่อนและเมื่อใช้งานไปนานๆ รอยกดจะค่อยๆ แพร่กระจายออกไปเป็นรอยแตก (Crack)
- 4) การสึกหรอแบบปฏิกิริยาไทรโบเคมี (Tribochemical reaction) การสึกหรอในลักษณะนี้บางครั้งเรียกว่าการสึกหรอแบบไปๆ กลับๆ หรือเฟล็ตติ้ง (Fretting wear) เนื่องจาก การที่ชิ้นงานต้องมีการขัดสี (Tribo) และเกิดปฏิกิริยาเคมี (Reaction) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง “ปฏิกิริยาออกซิเดชัน” เช่นการเกิด”ไทรโบเคมีคอลรีแอคชั่นที่ข้อต่อโซ่ (Chain) โดยที่หากว่าข้อ ต่อโซ่ปราศจากการบำรุงรักษา หรือไม่ได้หล่อลื่นตรงข้อโซ่ จะมีผลทำให้โซ่ดังกล่าวมีการสึกหรอแบบยึดติด เมื่อมีการใช้งานจะทำให้บริเวณข้อต่อโซ่ มีการขัดสี ก่อให้เกิดเศษแม่เหล็กตรง จุดนั้นผนวกเข้ากับความร้อนที่เกิดจากการขัดสี โดยผงเหล็กที่เกิดขึ้นก็เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี เช่นกัน เพราะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว ทำให้ออกซิเจนในอากาศสามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่ายโดย มีองค์ประกอบหลักคือ เศษเหล็ก ความร้อน ความชื้น กับออกซิเจนจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดสนิมที่เหล็ก จึงส่งผลทำให้ มีความแข็งเปราะ และจะมีการหลุด บริเวณข้อต่อโซ่ ทำให้ไม่สามารถจะทนรับภาระที่สูงจึงทำให้โซ่ชำรุด นอกจากนั้นการกัดกร่อน อุณหภูมิ และปฏิกิริยาอื่นๆ ก็จะเป็นตัวเร่งให้เกิดกลไกการสึกหรอแบบเฟล็ตติ้ง ในชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเครื่องยนต์ มีอยู่หลายจุดที่มีโอกาสที่จะเกิดการสึกหรอชนิดนี้ เช่น บริเวณหมุดย้ำที่ยึดแผ่นเหล็กเข้าด้วยกันในโครงเครื่องบิน เพลลา แหนบรถยนต์ เป็นต้น

นอกจากกลไกการสึกหรอหลักทั้ง 4 แบบแล้วยังมีกลไกการสึกหรอแบบอื่นๆ เช่น การสึกหรอแบบพ่นปะทะ (Erosion Wear) กลไกการสึกหรอแบบกัดกร่อน (Corrosive Wear) กลไกการสึกหรอแบบโพรงอากาศ (Cavitation wear) กลไกการสึกหรอแบบกระแทก (Impact Wear) เป็นต้น

ในโครงการพิเศษนี้ได้สนใจเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบขัดถูและเลือกวิธีการทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิสก์

เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิสก์ (Pin-on-Disc Wear Tester)

การทดสอบการสึกหรอแบบไถล เป็นการทดสอบแบบหนึ่งที่ใช้ทั้งในห้องปฏิบัติการ และการใช้งานทั่วไป โดยจะทำการทดสอบด้วยวัสดุ 2 ชนิดคู่กัน วัสดุชิ้นหนึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลมหรือแท่งทรงกระบอก ซึ่งเรียกว่าพิน ที่ถูกสวมด้วยลูกตุ้มเพื่อเพิ่มแรงกด วางตั้งฉาก และให้สัมผัสกับวัสดุอีกชิ้นหนึ่งที่มีลักษณะเป็นจานเรียกว่าดิสก์ โดยการทดสอบจะให้ดิสก์ หมุนในลักษณะวงกลมรอบตัวเองเกิดการเสียดสีระหว่างผิววัสดุทั้งสอง จนเกิดเป็นร่องการเสียดสี ที่เรียกว่ารอยสึก



รูปที่ 2.26 การทดสอบแบบพินออนดิสก์

ชิ้นงานที่นำมาทดสอบ สามารถใช้วัสดุได้หลากหลายชนิด หลากหลายประเภท แต่มีข้อกำหนดคือ ชิ้นงานต้องมีขนาดที่แน่นอน สามารถทนความเค้นที่เกิดขึ้น โดยไม่เกิดการโก่งงอในการทดสอบโดยทั่วไปชิ้นงานที่เป็นพินจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 - 10 มิลลิเมตร ชิ้นงานที่เป็นดิสก์ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20-100 มิลลิเมตร มีความหนา 2-10 มิลลิเมตร และผิวของชิ้นทดสอบต้องมีความหยาบผิว (Ra) ไม่เกิน 0.8 ไมโครเมตร

โดยที่ค่าแรงเสียดทานหาได้จากสมการ

$$y = 0.0319x + 2.9358 \quad (2.26)$$

เมื่อ y คือ ค่าแรงเสียดทาน

x คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า

จากนั้นนำค่าแรงเสียดทานที่ได้มาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ซึ่งหาได้จาก

$$\mu = \frac{y}{F} \quad (2.27)$$

เมื่อ μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

y คือ ค่าแรงเสียดทาน

F คือ โหลดที่ใช้ (N)

2.4.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

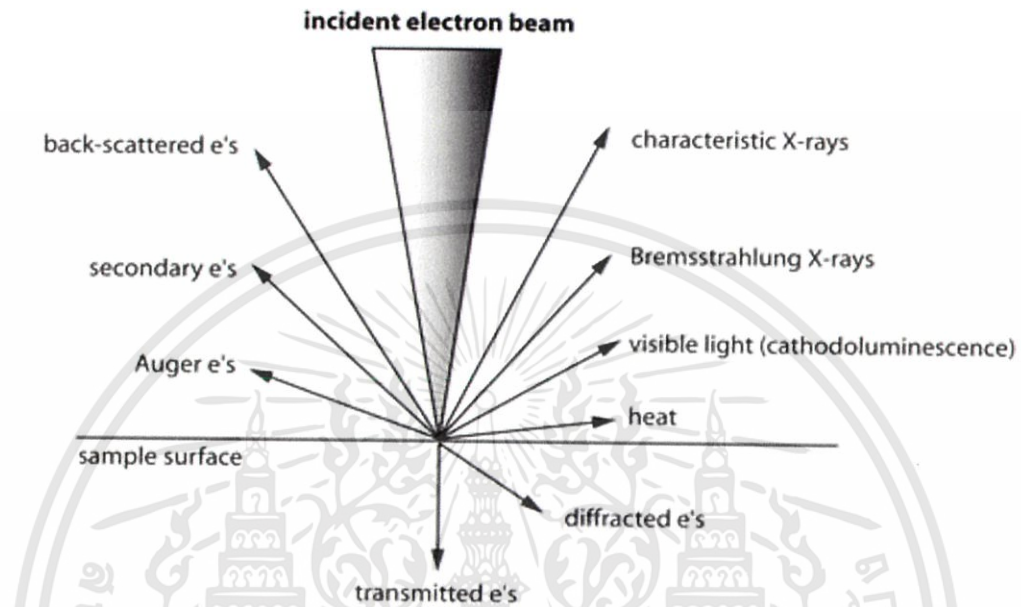
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นเครื่องมือสำคัญต่อการวิเคราะห์พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบ เนื่องจาก SEM มีกำลังขยายตั้งแต่ 20 ถึง 3,000 เท่า และสามารถวิเคราะห์ชั้นเคลือบได้ลึกได้ถึง 300 เท่าของกล้องจุลทรรศน์ปกติ ทำให้ได้ผลดีต่อการวิเคราะห์ การวิเคราะห์ต้องทำความสะอาดชิ้นงานด้วยสารละลาย ทั้งนี้เนื่องจากชิ้นงานที่จะทำการทดสอบต้องอยู่ในสภาวะสุญญากาศ และถ้าหากชิ้นงานไม่นำไฟฟ้าต้องไปเคลือบด้วยทองคำป้องกันไม่ให้อิเล็กตรอนไปสะสมที่บนผิวชิ้นงานได้ โดยทั่วไป SEM มักต่อพ่วงอยู่กับการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์ ทั้งนี้เพื่อวิเคราะห์ชนิดของธาตุของชิ้นงาน ซึ่งเรียกเทคนิคนี้ว่า Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS)



รูปที่ 2.27 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากรูป 2.26 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้ ส่วนบนสุดเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (electron gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ซึ่งมีสภาพเป็นสุญญากาศด้วยความต่างศักย์แรงในช่วง 0 ถึง 30 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าด้วยกัน 2 ชุด และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยแอฟเพอร์เจอร์ (aperture) ซึ่งมีขนาดต่างกัน ตามลักษณะการใช้งาน ส่วนเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรกเรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (condenser lens) นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมลำอิเล็กตรอนเพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจกแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลงสำหรับเลนส์วัตถุ (electron optictive) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้ายจะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอนให้ไปตกบนผิวตัวอย่างชิ้นงาน โดยมีขดลวดควบคุมลำแสงอิเล็กตรอน (scanning coils) ทำหน้าที่กราดลำเอกสาร์นี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของชิ้นงานในกรอบพื้นที่ที่ละเอียดเล็ก ๆ ซึ่งพื้นที่ผิวของชิ้นงานบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้จะเกิดสัญญาณต่างๆ ขึ้นหลายชนิด ดังรูป 2.27 และในตัวเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราดยังมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (detector) ชนิดต่างๆ เพื่อประมวลผลออกมาเป็นภาพ



รูปที่ 2.28 สัญญาณต่างๆ ที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างสารตัวอย่างกับลำอิเล็กตรอน

2.4.6 กล้องจุลทรรศน์ชนิด Light microscope

ในปัจจุบันกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (light microscope) ได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นยิ่งกว่าในอดีต กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสงที่ดีที่สุดในปัจจุบัน ซึ่งประกอบด้วยเลนส์ 2 ชุด คือ

- 1) เลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) เป็นเลนส์นูน มีกำลังขยายขนาดต่างๆ กันคือ 4X 10X 40X และ 100X สำหรับเลนส์ 100X นั้นต้องใช้น้ำมันเป็นตัวกลางระหว่างสไลด์ที่วางวัตถุกับเลนส์ใกล้วัตถุ เลนส์เหล่านี้ติดอยู่กับแป้นซึ่งหมุนได้โดยรอบ เพื่อปรับกำลังขยายที่ต้องการใช้ให้มาอยู่ตรงกับแท่นวางวัตถุ ตามปกติการเพิ่มกำลังของเลนส์ มักเริ่มจากการใช้เลนส์ใกล้วัตถุที่มีกำลังขยายต่ำก่อนแล้วเปลี่ยนเป็นกำลังขยายกลางและกำลังขยายสูงไปตามลำดับ
- 2) เลนส์ใกล้ตา (eyepiece) เป็นเลนส์นูนกำลังขยายเป็น 10X 15X และ 25X เลนส์ใกล้ตาลำนี้สามารถเลือกได้ตามที่ต้องการโดยการถอดขนาดที่ไม่ต้องการออกแล้วนำขนาดที่ต้องการ มาสวมที่ส่วนบนของลำกล้อง ตามปกติต้องสวมเลนส์ใกล้ตาไว้บนลำกล้องเสมอ เพื่อป้องกันฝุ่นละอองเข้าไปในลำกล้องและเพื่อความสะดวกในการนำไปใช้



รูปที่ 2.29 กล้องจุลทรรศน์ชนิด Light microscope

- 3) แหล่งกำเนิดแสง แสงที่ใช้กล้องแบบใช้แสงอาจเป็นแสงจากดวงอาทิตย์ตามธรรมชาติ กล้องชนิดนี้จะมีกระจกเงา 2 ด้าน ช่วยรวมแสงให้สะท้อนเข้าสู่ตรงกลางของแท่นวางวัตถุ กระจกเงาด้านเรียบใช้สำหรับรับแสงตามปกติ สำหรับวันที่มีแสงน้อยควรใช้กระจกเงาด้านโค้งเว้าเพื่อช่วยรวมแสง กระจกเงานี้บางกล้องออกแบบมาให้ถอดออกได้ แล้วใช้หลอดไฟเป็นแหล่งกำเนิดแสงแทน ซึ่งสะดวกต่อการนำไปใช้ เพราะใช้ได้ทั้งกลางวันและกลางคืน รวมทั้งในห้องที่มีแสงน้อย
- 4) การปรับความเข้มของแสง กล้องบางรุ่นจะมีเลนส์รวมแสง (condenser lens) อยู่ใต้แท่นวางวัตถุช่วยเพิ่มความเข้มของแสง และคัดเลือกแสงที่มีคุณภาพ นอกจากนี้ยังมีไดอะเฟรมช่วยปรับความเข้มของแสงตามที่ต้องการ เพื่อให้เห็นภาพของวัตถุชัดเจน

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กรณีการ วรรณทวี และคณะ ได้เคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนแผ่นซิลิกอนด้วยวิธีเอกซเรย์สเปกตรัม จากการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มที่เคลือบได้ด้วยเทคนิค XRD พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 37.5° , 63.6° และ 76.2° ซึ่งตรงกับโครเมียมไนไตรด์ที่ระนาบ (111), (220) และ (311) ตามลำดับ เมื่อความดันย่อยแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้น มีผลให้ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์มีค่าความหนาอยู่ในช่วง 30 nm ถึง 36 nm

Z. Han, J. Tian, Q. Lai, X. Yu, G. Li. ทำการวิจัยศึกษาผลของความดันของก๊าซไนโตรเจนที่มีผลต่อฟิล์ม เช่น เฟส โครงสร้าง อัตราการตกเคลือบ นอกจากนี้งานวิจัยยังเน้นถึง อิทธิพลของการไบเอสสารพื้นฐาน และคุณสมบัติของชั้นสารที่มีผลต่อโครงสร้าง ขนาดของผลึกและ Orientation

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรวิสา วงศ์ปัญญา และคณะ ได้ศึกษาความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 4140 โดยวิธีการกระบวนการเคลือบผิวด้วยไอพ่นพลาสมา โดยเหล็กกล้าถูกเคลือบด้วยโครเมียมไนไตรด์ที่มีความหนา 914 นาโนเมตร โดยขึ้นงานก่อนเคลือบนั้นได้ผ่านการเตรียมผิวที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหยาบต่างกัน แล้วศึกษาความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนัก ที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 2, 7 และ 10 พบว่าชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยโครเมียมไนไตรด์มีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีกว่าชิ้นงานเหล็กกล้าที่ไม่ถูกเคลือบที่ทุกค่าพีเอช โดยเมื่อความหยาบของชิ้นงานลดลงส่งผลให้ชิ้นงานมีความต้านทานการกัดกร่อนดีขึ้น

จักรพันธ์ ถาวรจิรา และคณะ ได้ศึกษาฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์โดยทำการเคลือบลงบนใบมีดตัดคว้านไส้สับปะรด โดยเปรียบเทียบอายุการใช้งานของชิ้นงานที่เคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และไม่เคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ แล้วได้นำชิ้นงานไปตัดสับปะรดจริง พบว่า ชิ้นงานที่เคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์สำหรับใบมีดสั้นนั้นมีอายุการใช้งานนานกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เคลือบสูงสุด 9 เท่า และสำหรับใบมียาว 6 เท่า แสดงให้เห็นว่าการเคลือบใบมีดด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์สามารถช่วยยืดอายุการใช้งานใบมีดตัดสับปะรด



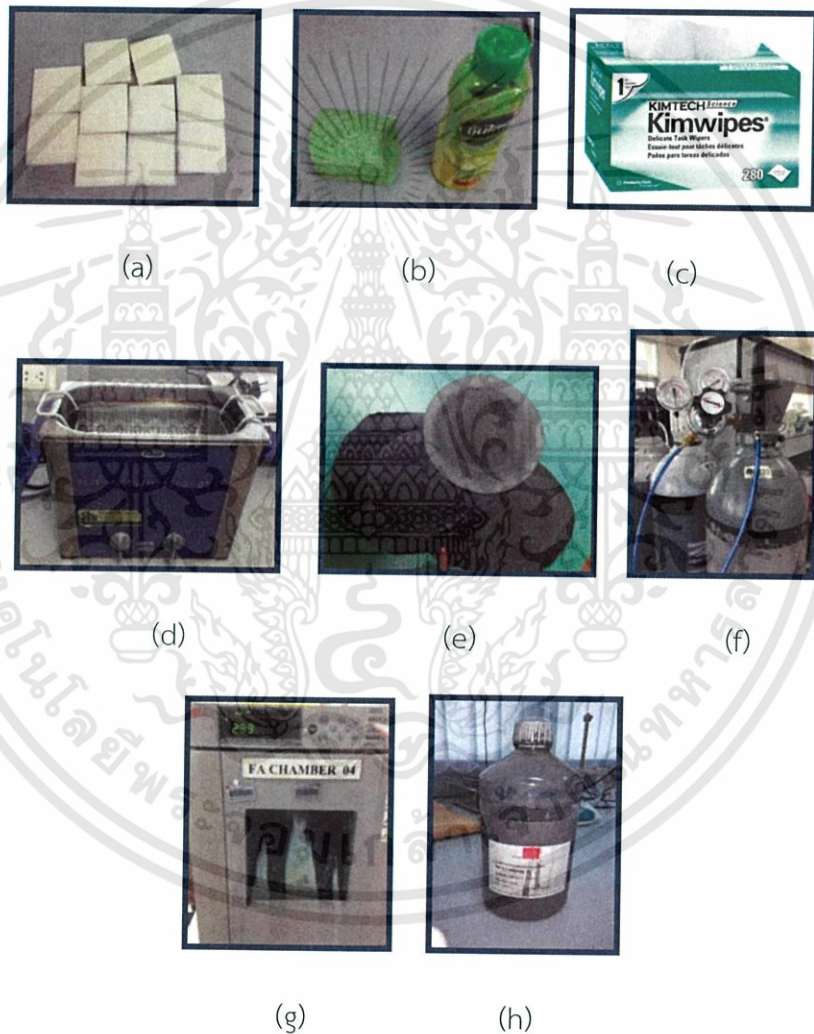
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการเตรียมพลาสติกชนิด ABS ในการเตรียมฟิล์ม และการเคลือบฟิล์ม-บางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การเตรียมพลาสติกชนิด ABS เพื่อใช้เป็นฐานรองรับ

3.1.1 อุปกรณ์



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ในการเตรียมพลาสติกชนิด ABS เพื่อใช้เป็นฐานรองรับ (a) พลาสติกชนิด ABS (b) น้ำยาล้างงานและฟองน้ำ (c) กระดาษเช็ดทำความสะอาด (d) เครื่องอัลตราโซนิก (e) กระดาษทราย (f) ที่เป่าลม (g) เครื่องอบ และ (h) ฝงเพชร ขนาดอนุภาค 0.1 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การเตรียมพลาสติกชนิด ABS



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมฐานรองรับ

- นำพลาสติกชนิด ABS มาขีดด้วยกระดาษทราย เบอร์ 800 1200 4000 และผงเพชรตามลำดับ



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการขีดพลาสติกชนิด ABS ด้วยกระดาษทรายและผงเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) นำพลาสติกชนิด ABS ไปล้างทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน และขัดด้วยฟองน้ำ



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการล้างพลาสติกชนิด ABS ด้วยน้ำยาล้างจาน

- 3) แช่พลาสติกชนิด ABS ลงในเครื่องอัลตราโซนิก โดยน้ำที่ใส่ลงไปเครื่องเป็นน้ำ DI เพื่อทำความสะอาดพื้นผิวอีกครั้ง ใช้เวลา 15 นาที



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการล้างพื้นผิวด้วย เครื่องอัลตราโซนิก

- 4) นำพลาสติกชนิด ABS ที่ล้างทำความสะอาดเสร็จแล้ว ไปเป่าให้แห้งด้วยที่เป่าลม



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการเป่าพลาสติกชนิด ABS ให้แห้ง

- 5) เมื่อทำความสะอาดพื้นผิวของพลาสติกชนิด ABS เสร็จ นำชิ้นมาเช็ดด้วยกระดาษเช็ดทำความสะอาด



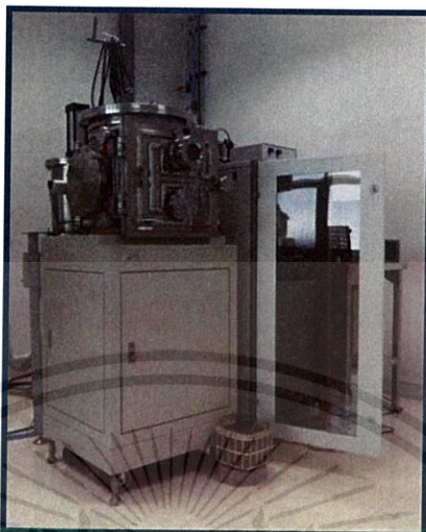
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการเช็ดทำความสะอาด

- 6) นำพลาสติกชนิด ABS ที่ได้เข้าเครื่องอบ เพื่ออบไล่ไอน้ำจากการล้างบนพลาสติกชนิด ABS ด้วยอุณหภูมิ 60°C เวลา 30 นาที



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการอบพลาสติกชนิด ABS

3.2 การเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ด้วยวิธีอีวีซีรีเอกทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง



รูปที่ 3.9 ภาพแสดงเครื่องอีวีซีรีเอกทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง

3.2.1 ส่วนประกอบของเครื่อง

- 1) ห้องเคลือบสุญญากาศ ภายในห้องเคลือบสุญญากาศจะประกอบไปด้วย
 - ชุดเตอร์ ทำหน้าที่ปิดไอออนจากเป้าเพื่อไม่ให้ไอออนของไทเทเนียมตกลงแผ่นรองรับ
 - เป้าสารเคลือบ เป็นที่ติดตั้งเป้าไทเทเนียมและแม่เหล็ก
 - จานวางแผ่นรองรับ
 - หลอดไฟ ทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิให้กับแผ่นรองรับ
- 2) ระบบหล่อเย็น ทำหน้าที่ควบคุมกับขดลวดความร้อนที่เป้าสารเคลือบไม่ให้ความร้อนมากเกินไป
- 3) แหล่งจ่ายไฟ ทำหน้าที่จ่ายไฟเข้าไปในห้องเคลือบ
- 4) แหล่งจ่ายไฟในการหมุนแท่นวางชิ้นงาน
- 5) ถังแก๊สที่ใช้ในการเคลือบ แก๊สอาร์กอน, แก๊สไนโตรเจน
- 6) ปั๊มดูดอากาศ (Rotary pump) ทำหน้าที่ดูดอากาศภายในห้องเคลือบให้เป็นสภาวะแบบสุญญากาศ
- 7) ถังควบคุมความดันแก๊ส ทำหน้าที่ควบคุมระดับความดันของแก๊สอาร์กอนและแก๊สไนโตรเจนที่ป้อนให้กับห้องเคลือบสุญญากาศ
- 8) แผงควบคุมความดันในห้องเคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

(b)

(c)



(d)

(e)

(f)



(g)



(h)

รูปที่ 3.10 ส่วนประกอบของเครื่อง (a) ภาชนะสุญญากาศ (b) ระบบหล่อเย็น (c) แหล่งจ่ายไฟในระบบ (d) แหล่งจ่ายไฟในการหมุนแท่นวางชิ้นงาน (e) ถังแก๊สที่ใช้ในการเคลือบ (f) ปั๊มดูดอากาศ (Rotary pump) (g) กล้องควบคุมความดันแก๊ส และ (h) แผงควบคุมความดันในห้องเคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขั้นตอนการใช้เครื่องในการเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN)

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

ตัวแปร	ค่าที่กำหนด
ความดันพื้นฐาน	1.7×10^{-5} mbar
ความดันรวม	4×10^{-3} mbar
ระยะห่างระหว่างเป้ากับพื้นผิวรองรับ	7 cm
ความเร็วรอบ	10 รอบ/นาที
กำลังไฟฟ้าขณะเคลือบโครเมียมไนไตรด์	125 W, 150 W, 175 W, 200 W
ความดันไนโตรเจนต่อความดันรวม	30%

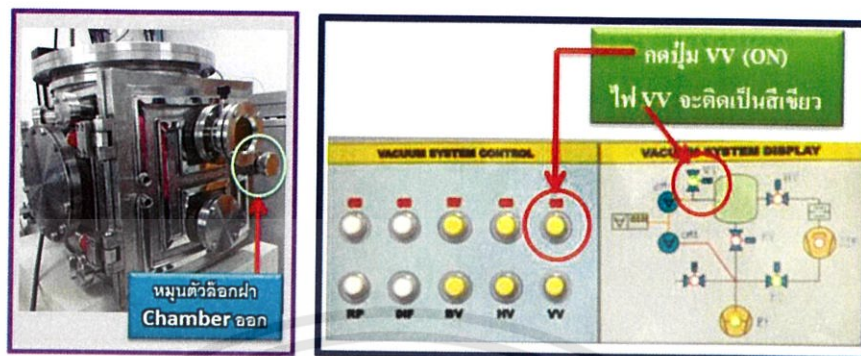
3.3.1 ขั้นตอนในการเคลือบ

- 1) เปิดปั๊มลมที่ห้องควบคุม
- 2) เปิดฝา Chamber โดยการกดปุ่ม RP (ON) เมื่อกดแล้ว ไฟแสดง RP กับ BV จะติดเป็นสีเขียว



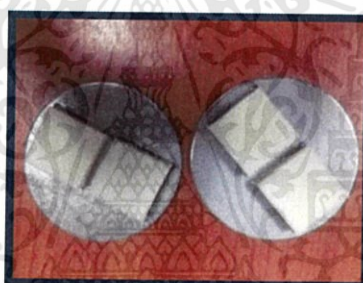
รูปที่ 3.11 เตรียมห้องสุญญากาศให้มีอากาศภายในเท่ากับภายนอก

- 3) หมุนตัวล็อกฝา Chamber ออก แล้วกดปุ่ม VV (ON) ไฟ VV จะติดเป็นสีเขียว รอจนฝา Chamber จะเปิดออก



รูปที่ 3.12 การเปิดตัวล็อกฝาห้องสุญญากาศ

- 4) นำชิ้นงานที่เป็นพลาสติกชนิด ABS มาวางบนแท่นวางชิ้นงาน



รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการวางชิ้นงาน

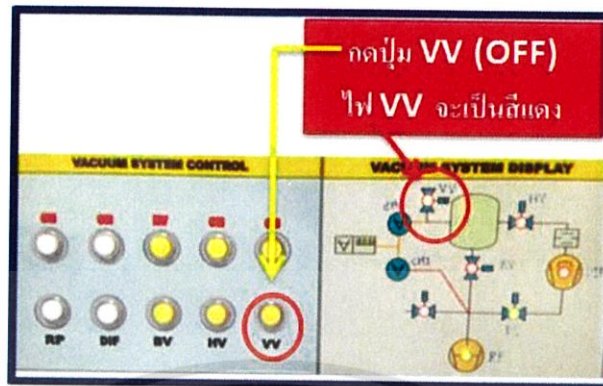
- 5) นำแท่นวางชิ้นงานไปวางบนจานรองแผ่นรองรับ โดยพื้นผิวรองรับมีระยะห่างจากเป่าเป็นระยะ 7 เซนติเมตร



รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการวางแท่นวางชิ้นงานบนจานรองแผ่นรองรับ

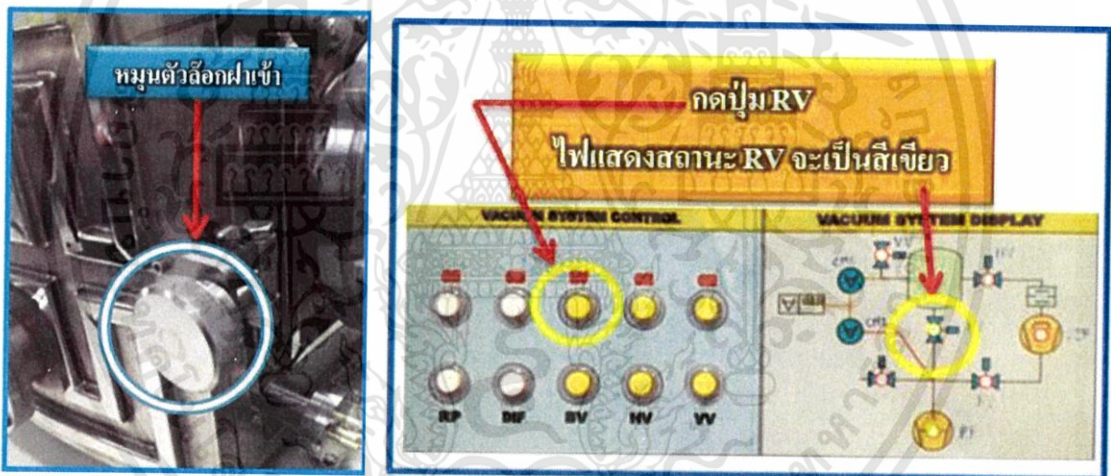
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) เมื่อฝา Chamber ปิดแล้ว ให้ทำการกด VV (OFF) ไฟ VV จะเป็นสีแดง



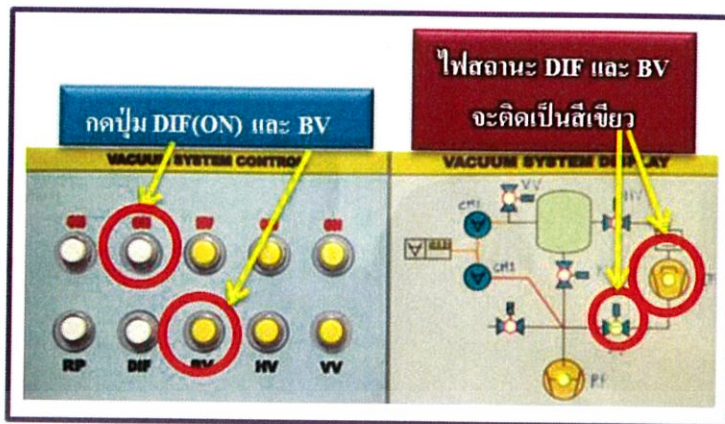
รูปที่ 3.15 การปิดฝาห้องสุญญากาศ

7) เมื่อวางพื้นผิวรองรับลงบนแท่นรองรับเสร็จแล้ว ทำการปิดฝาแล้วหมุนตัวล็อกฝาเข้า จากนั้น กด RV เพื่อดูดอากาศออกจาก Chamber ไฟแสดงสถานะ RV จะเป็นสีเขียว



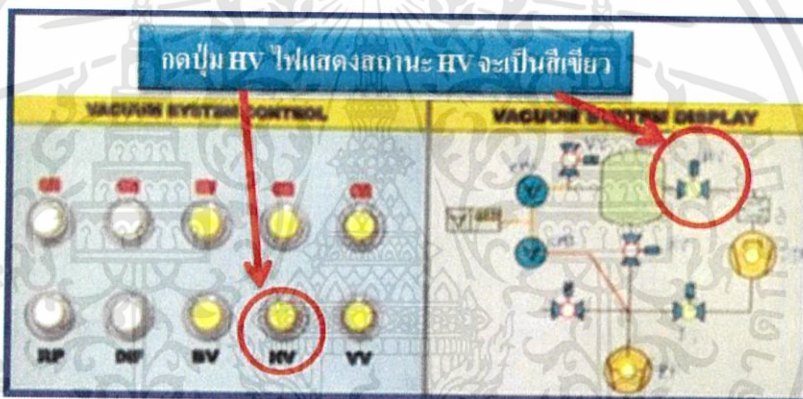
รูปที่ 3.16 ล็อกฝาห้องสุญญากาศและดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศ

- 8) กด BV และ RV สลับกันจนกระทั่งความดันภายใน Chamber ลดลงเหลือประมาณ 3.0×10^{-2} mbar
- 9) เปิดระบบทำความเย็นเพื่อไม่ให้ระบบภายใน Chamber ร้อนเกินไป
- 10) หลังจากเปิดระบบ cooling แล้วให้กดปุ่ม DIF (ON) และ BV เพื่อทำให้ความดันภายใน Chamber ลดลง ไฟสถานะ DIF และ BV จะติดเป็นสีเขียว จับเวลา 20 นาที



รูปที่ 3.17 การเปิด Division pump

- 11) เมื่อครบ 20 นาทีแล้วให้กดปุ่ม HV เพื่อทำให้ความดันลดลง ไฟแสดงสถานะ HV จะเป็นสีเขียว แล้วรอให้ความดันลดลงจนต่ำกว่า 2.0×10^{-5} mbar



รูปที่ 3.18 การดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศทำให้ความดันภายในลดลง

- 12) เมื่อความดันลดลงต่ำกว่า 2.0×10^{-5} mbar แล้ว เปิดวาล์วก๊าซอาร์กอน (Ar) เพื่อทำการล้างเป้า ใช้ โดยก๊าซอาร์กอน (Ar) แล้วปรับความดันที่ CH1 ให้มีความดันเป็น 4.0×10^{-3} mbar และใส่ กระแสจากเครื่องจ่ายกระแส 100 W โดยการปรับ Modify =34 จากเครื่อง Regulation จับ เวลา 10 นาที ในขณะที่ล้างเป้าเปิด power supply จ่ายไฟ 0.18 A 2.4 V เพื่อให้จานรองแผ่น ฐานรองหมุน ในขณะที่การเคลือบ



รูปที่ 3.19 แสดงความดันในห้องเคือบบนแผงควบคุม



รูปที่ 3.20 power supply

- 13) เมื่อครบเวลา 10 นาที ปิด output จากเครื่อง Regulation และปิดแก๊สอาร์กอน รอกจากแผงควบคุมความดันลด
- 14) เมื่อความดันลด ใส่แก๊สไนโตรเจน (N_2) ซึ่งในการเคลือบใช้แก๊สไนโตรเจน 30% โดยปรับ CH2 ให้ Modify =75 ให้ความดันบนแผงควบคุมขึ้น 1.2×10^{-3} mbar และใส่แก๊สอาร์กอน (Ar) โดยปรับ CH1 ให้ความดันบนแผงควบคุมขึ้น 4.0×10^{-3} mbar



รูปที่ 3.21 ปรับความดันแก๊สไนโตรเจนและแก๊สอาร์กอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 15) ทำการเคลือบใส่กำลังไฟฟ้าจากเครื่องจ่ายกำลัง จากเครื่อง Regulation
 โดยที่ 125 W โดยการปรับ Modify = 41
 150 W โดยการปรับ Modify = 50
 175 W โดยการปรับ Modify = 58
 200 W โดยการปรับ Modify = 68 ตามลำดับ

แล้วเปิด output

- 16) หมุนแกนเหล็กในทิศตามเข็มนาฬิกาเพื่อเปิดแผ่นที่กั้นระหว่างเป้ากับชิ้นงาน เพื่อให้พลาสมาตกลงชิ้นงาน จับเวลา 10 นาที



รูปที่ 3.22 หมุนแกนเหล็กเพื่อเปิดเป้าก่อนการเคลือบ

- 17) เมื่อครบ 10 นาที หมุนแกนเหล็กในทิศทวนเข็มนาฬิกาเพื่อปิดแผ่นที่กั้นระหว่างเป้ากับชิ้นงาน แล้วทำการปิด output ที่เครื่อง Regulation และลดแก๊สไนโตรเจนกับแก๊สอาร์กอน โดยปรับจาก CH1 CH2 ตามลำดับ จับเวลา 5 นาที



รูปที่ 3.23 หมุนแกนเหล็กเพื่อปิดเป้าก่อนการเคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 18) ครอบเวลา 5 นาที ทำขั้นตอนที่ (15) ถึงขั้นตอนที่ (17) ให้ครบ 12 รอบ
- 19) เมื่อครบ 12 รอบ ทำการหมุนแกนเหล็กในทิศทางเข็มนาฬิกาเพื่อปิดแผ่นที่กั้นระหว่างเป้ากับชิ้นงาน ทำการปิด output ที่เครื่อง Regulation และลดแก๊สไนโตรเจนกับแก๊สอาร์กอน โดยปรับจาก CH1 CH2 ตามลำดับ ให้ Modify = 0
- 20) กดปุ่ม DIF (OFF) ไฟแสดงสถานะจะเป็นสีแดง เมื่อกดปิด DIF แล้ว รอจนความดันประมาณ E-3 mbar (20 นาที) แล้วทำการกดปิด HV ไฟแสดงสถานะจะเป็นสีแดง
- 21) เมื่อปิด HV แล้วรอจนเครื่องเริ่มเย็นแล้วปิดระบบทำความเย็น
- 22) เปิด Chamber โดยทำเหมือนขั้นตอนที่ 3-4 จากนั้นนำ Sample ออกมา แล้วทำการปิด Chamber โดยการปิดฝาและหมุนตัวล็อกเข้า จากนั้น กด RV
- 23) กด RP (OFF) แล้วปิดสวิตช์เครื่องควบคุม

3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ

3.4.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ x-ray diffraction

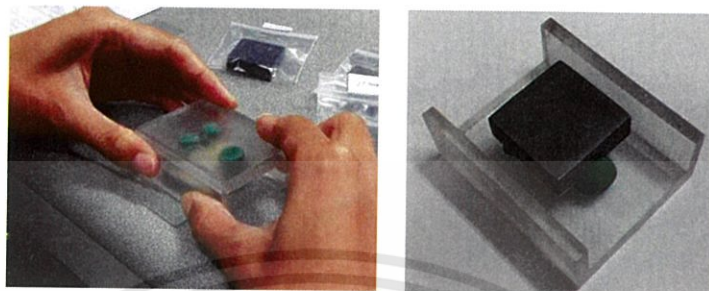
3.4.1.1 ส่วนประกอบของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ รุ่น D8DISCOVER



รูปที่ 3.24 ภาพส่วนประกอบของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

- (a) แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์
- (b) X-ray Detector
- (c) ฐานรองรับตัวอย่าง

- 1) เมื่อเคลือบชิ้นงานพลาสติกชนิด ABS ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ด้วยกำลังไฟฟ้า 125 W, 150 W, 175 W และ 200 W มาติดบนฐานรองชิ้นงานโดยใช้ดินน้ำมันในการติด



รูปที่ 3.25 การนำติดชิ้นงานบนฐานรองชิ้นงาน

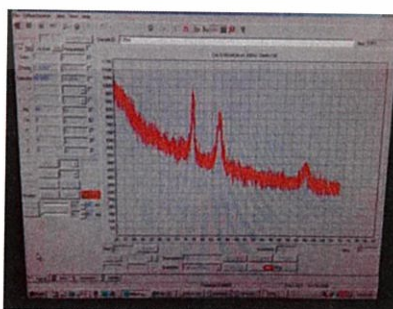
- 2) นำชิ้นงานที่ติดบนฐานรองชิ้นงาน มาวางบนฐานรองวัสดุรองรับ



รูปที่ 3.26 วางชิ้นงานบนฐานรองวัสดุรองรับ

- 3) ป้อนข้อมูลลงในโปรแกรม DIFFRAC plus XRD Commander เพื่อให้โปรแกรมประมวลผลแสดงเป็นกราฟ

โดยกำหนดข้อมูล Start = 20
Increment = 0.02
Stop = 80



รูปที่ 3.27 กราฟที่ได้จากการประมวลผลของโปรแกรม DIFFRAC plus XRD Commander

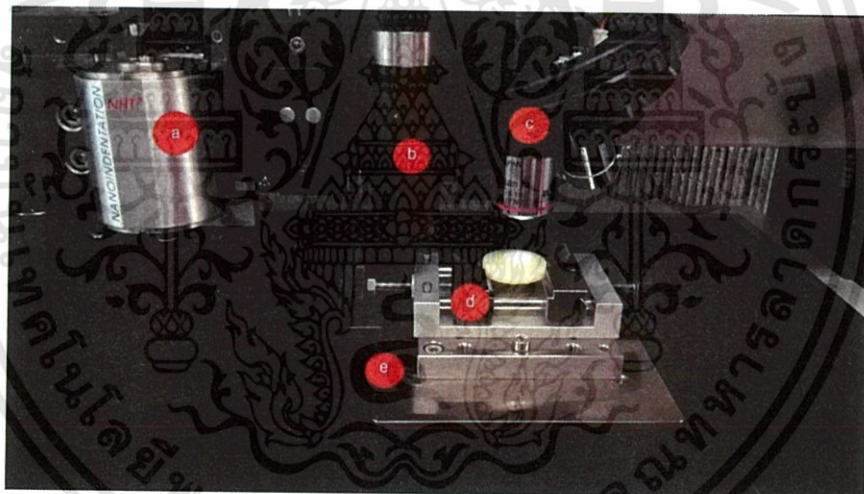
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ Nano Indentation Hardness

3.4.2.1 เครื่องวิเคราะห์ Nano Indentation Hardness ของบริษัท CSM Instruments Switzerland รุ่น NHT²



รูปที่ 3.28 เครื่องวิเคราะห์ Nano Indentation Hardness

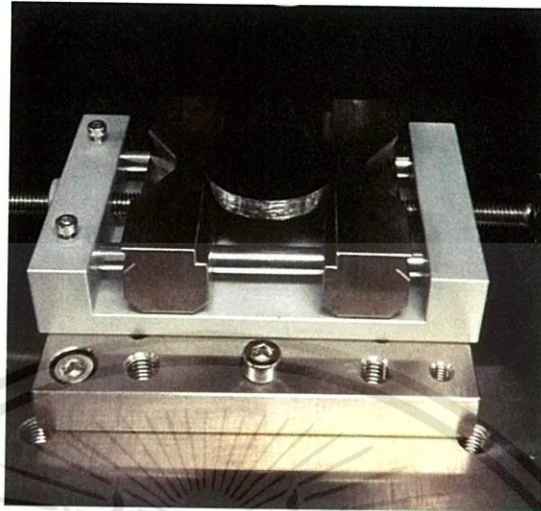


รูปที่ 3.29 ส่วนประกอบของเครื่องวิเคราะห์ Nano Indentation Hardness

- (a) Nano hardness head
- (b) AFM
- (c) Microscope
- (d) Samples stand
- (e) Motor X & Y precision up to micron

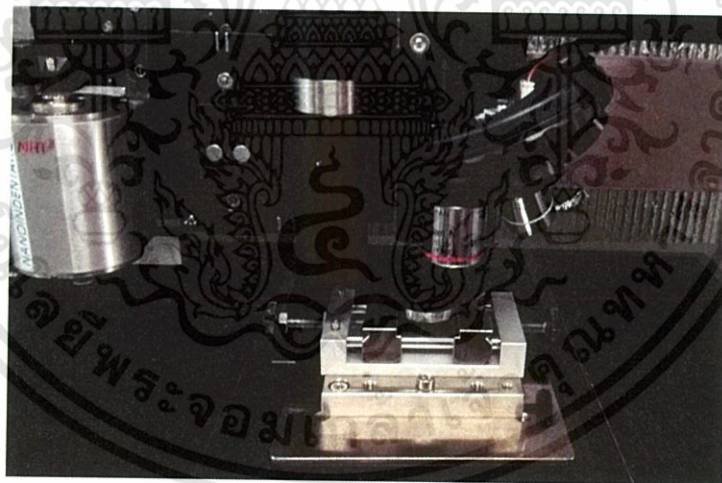
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) นำชิ้นงานพลาสติกชนิด ABS ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) มาติดบนฐานรองชิ้นงาน



รูปที่ 3.30 การติดชิ้นงานบนฐานรองชิ้นงาน

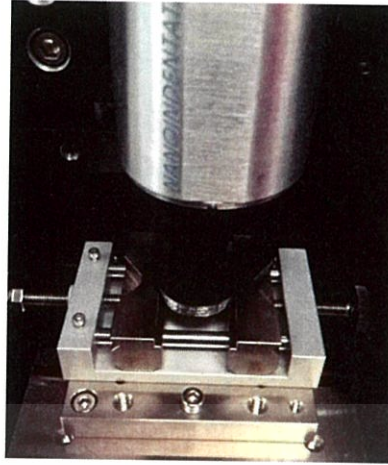
- 2) เลื่อนฐานรองชิ้นงานให้ตรงกับไมโครสโคป (Microscope) ส่องพื้นผิวของชิ้นงานเพื่อระบุตำแหน่งของหัวกด โดยเลือกพื้นผิวที่ไม่มีรอยขีดข่วน



รูปที่ 3.31 การส่องพื้นผิวของชิ้นงาน

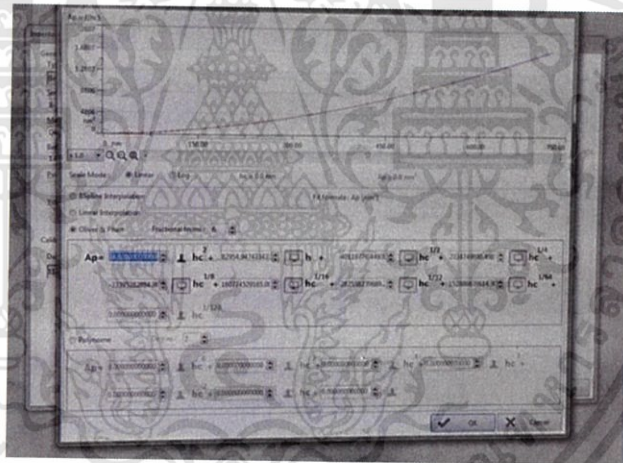
- 3) เลื่อนฐานรองชิ้นงานให้ตรงกับหัววัด จากนั้นเลื่อนหัววัดไปสัมผัสกับพื้นผิวของชิ้นงานเพื่อทำการกำหนดระยะพื้นผิวที่แน่นอนโดยใช้ reference rings ในการวัดก่อนที่จะกดหัววัดแบบ Berkovich indent ลงไปบนผิวชิ้นงานโดยที่กดลงไปด้วยความลึกเป็น 10% ของความหนาของชิ้นงาน โดยใช้แรงกดที่ 100 nm ค่อยๆ กดหัววัดลงไปบนชิ้นเป็นเวลา 30 วินาที และค้างหัววัดไว้ 10 วินาที จากนั้นจึงค่อยๆ ถอนหัววัดออกในระยะเวลา 30 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.32 การเลื่อนฐานรองชิ้นงานให้ตรงกับหัววัดและทำการวัดชิ้นงาน

- 4) ผลที่ได้แสดงในโปรแกรม CSM Instruments software เพื่อหาค่าความแข็ง (hardness) และ ค่าความยืดหยุ่น (Elastic Modulus) โดยมีการกำหนดค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) เท่ากับ 0.28

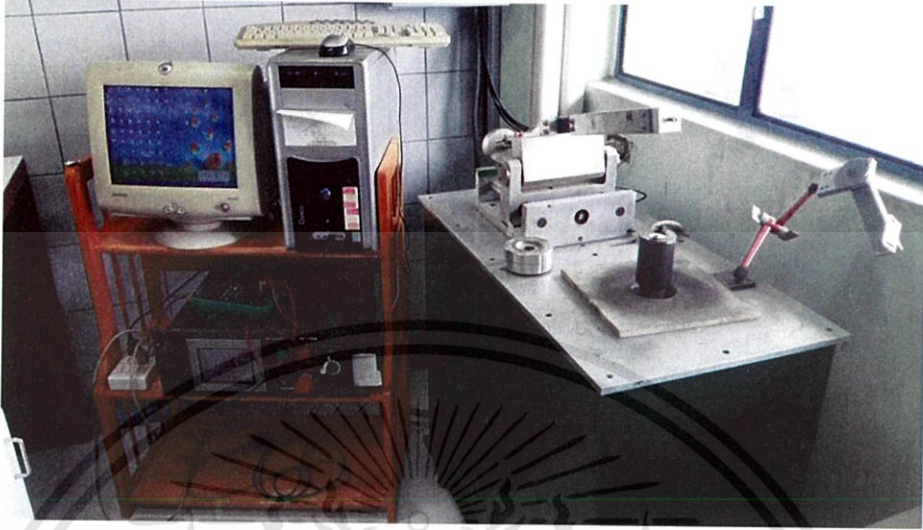


รูปที่ 3.33 กราฟที่ได้จากโปรแกรม CSM Instruments software

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ Tribology

3.4.3.1 ส่วนประกอบของเครื่องวิเคราะห์ Tribology ที่มีการออกแบบขึ้นมา



รูปที่ 3.34 Pin on disk



รูปที่ 3.35 (a) ลักษณะของ ดิสก์

(b) ลักษณะของ พิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) นำพลาสติกชนิด ABS และฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS ด้วยกำลังไฟฟ้า 125 W และ 175 W ที่เตรียมไว้ มาวางบนดิสก์



รูปที่ 3.36 ชิ้นงานที่ติดบน ดิสก์

- 2) นำลูกบอลแบร์ริงที่ทำจากเหล็กเจือโครเมียม มาล้างทำความสะอาดด้วยอะซิโตนก่อนนำไปใช้ แล้วนำไปใส่ในพิน



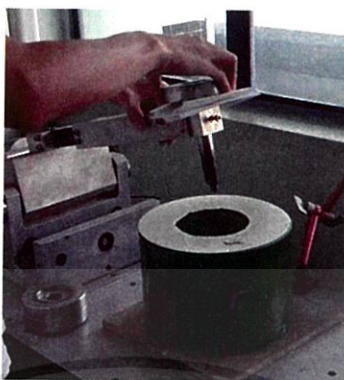
รูปที่ 3.37 การล้างทำความสะอาดลูกบอลแบร์ริง



รูปที่ 3.38 การนำลูกบอลแบร์ริงใส่ในพิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) เมื่อทำการใส่ลูกบอลแบร์ริงลงในพิน แล้วจึงค่อยนำไปติดตั้งที่ตัวเครื่อง

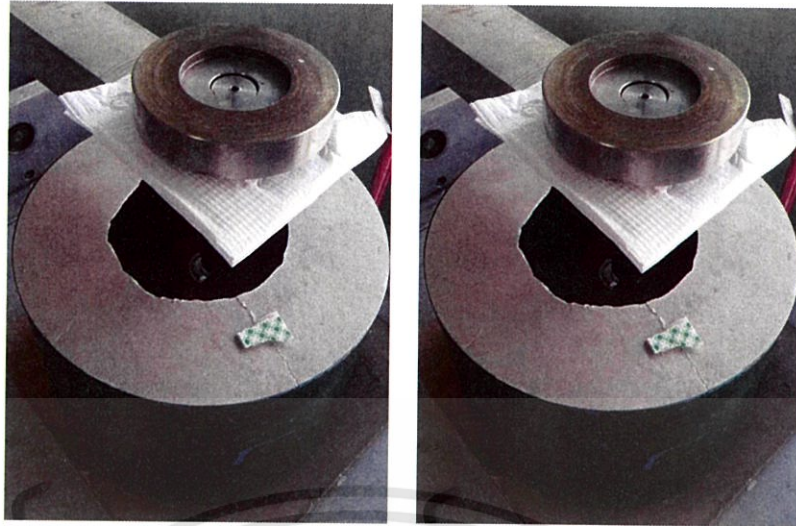


รูปที่ 3.39 การติดตั้งพินกับตัวเครื่อง

4) วางพินให้สัมผัสผิวชิ้นงานที่ติดอยู่บนดิสก์ โดยตั้งค่าให้พินมีความขนานกับพื้น จากนั้นนำโหลดที่ต้องการมากดบนลงพิน



รูปที่ 3.40 การวิเคราะห์พลาสติกชนิด ABS โดยใช้โหลด 10 N



(a)

(b)

รูปที่ 3.41 การวิเคราะห์ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบบนพลาสติกชนิด ABS ด้วยกำลังไฟฟ้า (a) 125 W และ (b) 175 W โดยใช้โหลด 10 N

- 5) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะแสดงบนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงานของเครื่อง Tribology ซึ่งค่าที่ได้เป็นค่าของแรงดันไฟฟ้า



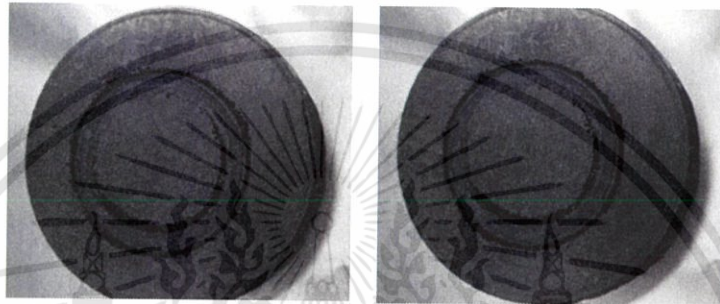
รูปที่ 3.42 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงานของเครื่อง Tribology

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) จะได้ชิ้นงานและลูกบอลแบร์ริงที่ได้จากการวิเคราะห์ Tribology ดังรูปที่ 3.42



รูปที่ 3.42 ชิ้นงานพลาสติกชนิด ABS ที่ได้จากการวิเคราะห์ Tribology โดยใช้โหลด 10 N



(a)

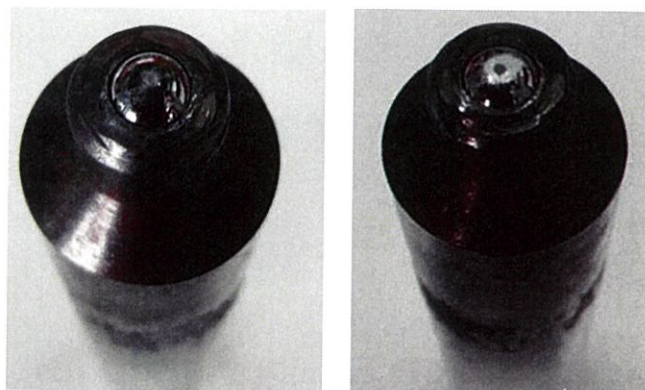
(b)

รูปที่ 3.44 ชิ้นงานฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS ด้วยกำลังไฟฟ้า

(a) 125 W และ (b) 175 W ที่ได้จากการวิเคราะห์ Tribology โดยใช้โหลด 10 N



รูปที่ 3.45 ลูกบอลแบร์ริงที่กดลงบนพลาสติกชนิด ABS โดยใช้โหลด 10 N



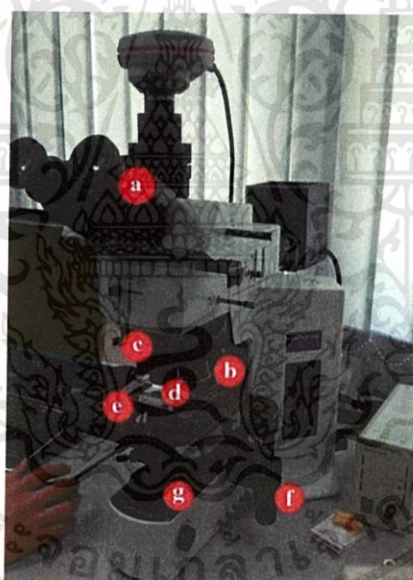
(a)

(b)

รูปที่ 3.46 ลูกบอลแวริงที่ตกลงบนฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS ที่กำลังไฟฟ้า (a) 125 W และ(b) 175 W โดยใช้โหลด 10 N

3.4.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์กล้อง Microscope

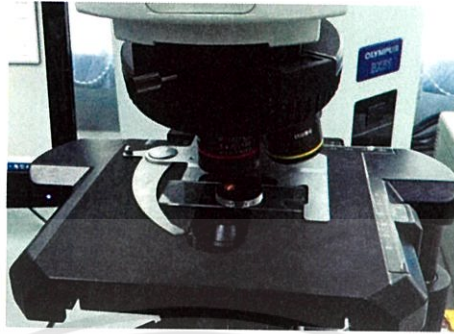
3.4.4.1 ส่วนประกอบของเครื่องวิเคราะห์กล้อง Microscope



รูปที่ 3.47 ส่วนประกอบของเครื่องวิเคราะห์กล้อง Microscope

- (a) เลนส์ใกล้ตา (b) เลนส์ใกล้วัตถุ (c) จานหมุน
 (d) เลนส์รวมแสง (e) แท่นวางสไลด์ (f) ปรับเลื่อนสไลด์
 (g) แหล่งกำเนิดแสง

- 1) นำชิ้นงานที่ผ่านการวิเคราะห์ Tribology มาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โดยใช้กำลังขยายที่ 50X, 100X และ 500X

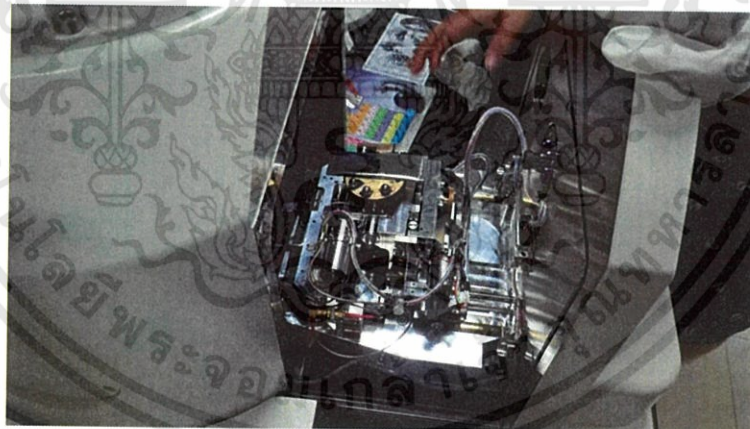


รูปที่ 3.48 ลักษณะการวางชิ้นงานลงบนจานหมุน

3.4.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ Scanning electron microscope, SEM

3.4.5.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น EVO MA10 จากบริษัท ZEISS

- 1) นำลูกบอลแบร์ริงที่ผ่านการวิเคราะห์ Tribology มาติดบนฐานรองชิ้นงานในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 3.49 การติดลูกบอลแบร์ริงกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) จากนั้นทำการปิดภาชนะสุญญากาศ เพื่อส่งลูกบอลแข็งเพื่อหารอยสึกหรอของลูกบอลแข็ง



รูปที่ 3.50 การปิดภาชนะสุญญากาศ

3.4.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์ Atomic Force Microscopy, AFM

3.4.6.1 ลักษณะของเครื่องวิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม รุ่น Park XE100 จากบริษัท park systems



รูปที่ 3.51 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.6.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy, AFM)

- 1) นำชิ้นงานมาทำความสะอาดด้วย Ethanol



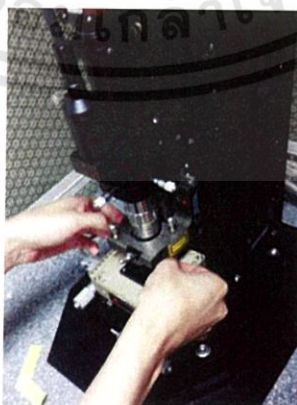
รูปที่ 3.52 การทำความสะอาดชิ้นงานด้วย Ethanol

- 2) นำชิ้นงานที่ทำความสะอาดเสร็จเรียบร้อยแล้ว มาติดตั้งบนฐานรองชิ้นงานในเครื่องวิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม



รูปที่ 3.53 การติดตั้งชิ้นงานกับกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

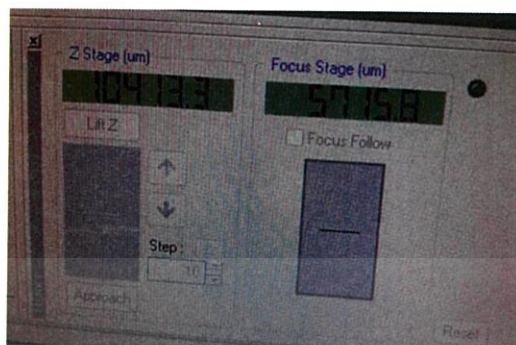
- 3) หมุนเพื่อปรับหัวเข็มวัดให้ลงมาจนได้ระยะหนึ่งก่อน



รูปที่ 3.54 หมุนปรับระยะของหัวเข็มวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) กดปรับโฟกัสให้เครื่องช่วยหาโฟกัสอัตโนมัติโดยคอมพิวเตอร์ที่ใช้การควบคุม และเลื่อนหาบริเวณที่ต้องการวัด

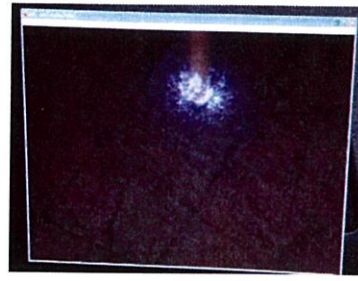


รูปที่ 3.55 กดปรับโฟกัส

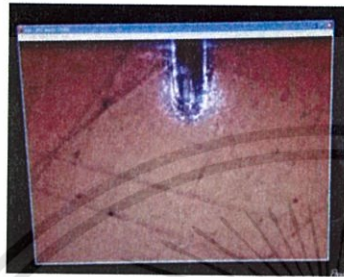


รูปที่ 3.56 เลื่อนปรับหาบริเวณที่ต้องการวัด

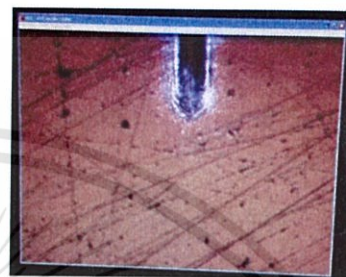
- 5) ปรับเข็มให้ลงมาบริเวณบนพื้นผิวของชิ้นงานพอดี โดยกดให้เครื่องปรับอัตโนมัติ ลักษณะของบริเวณที่ทำการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 3.57



(a)



(b)



(c)



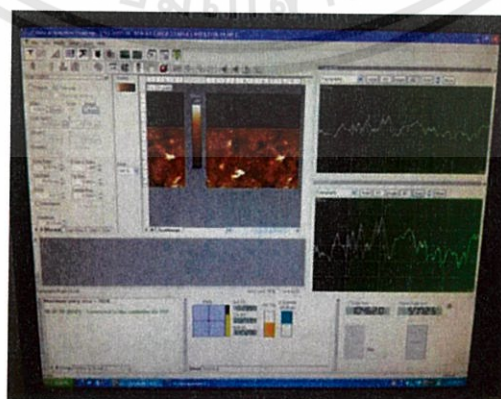
(d)



(e)

รูปที่ 3.57 ลักษณะบริเวณพื้นผิวที่ได้ทำการวิเคราะห์ของ (a) พลาสติกชนิด ABS และฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS ด้วยกำลังไฟฟ้า (b) 125 W, (c) 150 W, (d) 175 W และ (e) 200 W

6) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะแสดงบนหน้าจอของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการควบคุม



รูปที่ 3.58 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ที่แสดงบนคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการควบคุม

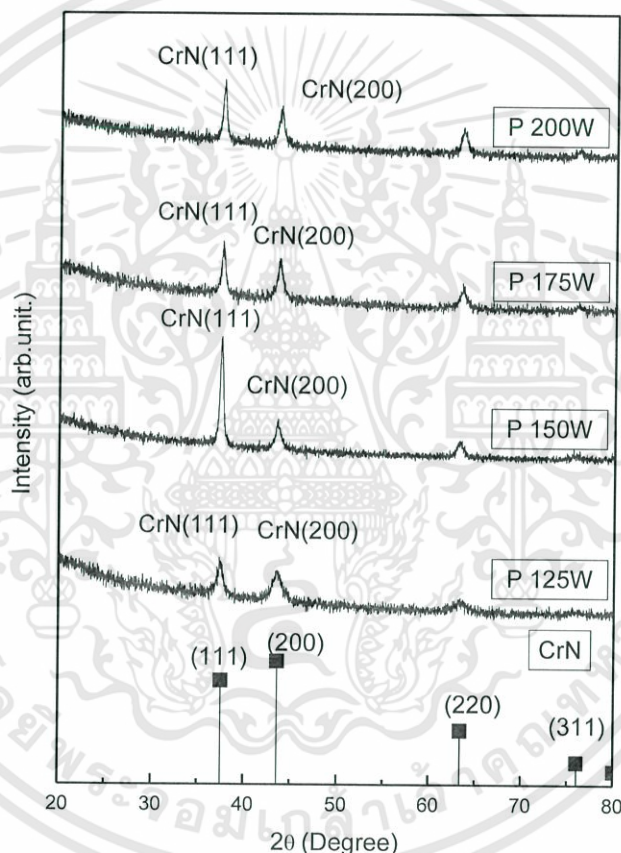
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการวิเคราะห์ X-ray diffraction (XRD)

การวิเคราะห์ X-ray diffraction (XRD) ของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS โดยมีอัตราส่วนความดันย่อยของไนโตรเจนต่อความดันรวมเป็น 30% และทำการเคลือบฟิล์มบางด้วยกำลังไฟฟ้า 125 W, 150 W, 175 W และ 200 W ระยะห่างระหว่างเป้าโครเมียมกับฐานวางวัสดุรองรับเท่ากับ 7 เซนติเมตร โดยใช้เครื่องทดสอบ X-ray diffraction (XRD) และกำหนดให้ Detector เคลื่อนที่รับสัญญาณข้อมูลทีละ 0.02 องศา/วินาที ได้ผลดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS ด้วยกำลังไฟฟ้า 125 W, 150 W, 175 W และ 200 W

จากรูปที่ 4.1 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในการทดสอบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) พบว่าการเลี้ยวเบนมีมุมเลี้ยวเบนตรงกับระนาบ (111), (200) และ (220) โดยมีมุมการเลี้ยวเบนคือ 37.525° , 43.605° และ 63.370° ตามลำดับ เมื่อเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน JCPDS 00-011-0065 จะพบว่าฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) มีโครงสร้างเป็นแบบคิวบิก โดยมีระนาบที่โดดเด่นคือ ระนาบ (111) และพบว่าระนาบดังกล่าวมีค่าความเข้มสูงที่สุดที่กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 150 W

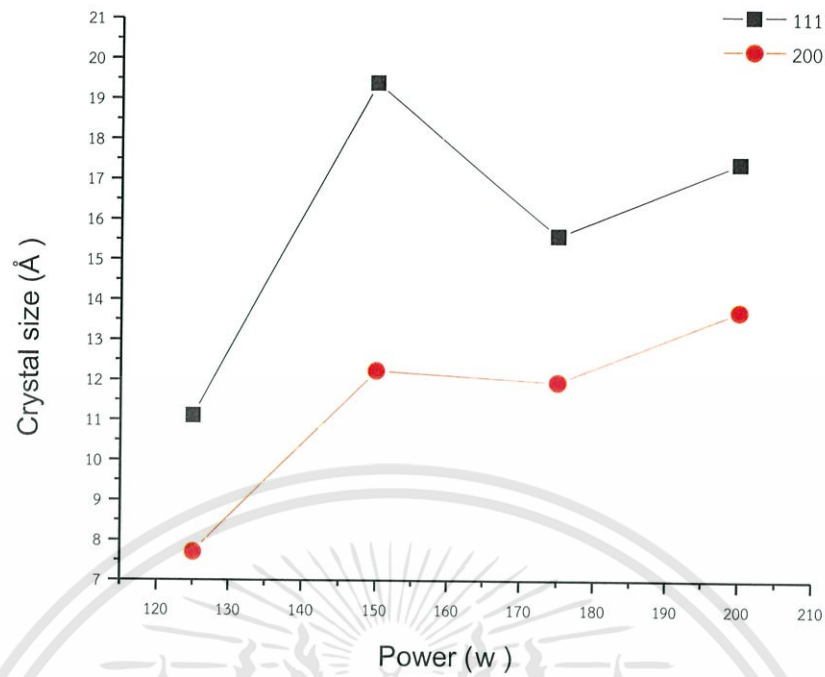
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ผลึกและขนาดของผลึก

	Power (W)	ระยะห่างระหว่างผลึก (nm)	Lattice constant (nm)	ขนาดของผลึก (Å)
CrN (111)	125	0.2402	0.4803	11.10
	150	0.2400	0.4800	19.39
	175	0.2395	0.4791	15.60
	200	0.2395	0.4790	17.41
CrN (200)	125	0.2075	0.4150	7.70
	150	0.2076	0.4151	12.23
	175	0.2073	0.4145	11.95
	200	0.2072	0.4145	13.73

จากสมการของแบรกก์ $2d \sin \theta = n\lambda$ โดยในการวัดใช้ CuK_{α} ที่มีความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.54056 Å สามารถคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบ (d-spacing) หาได้จากสมการ (2.4), ขนาดของผลึก (crystal size) หาได้จากสมการ $d = \frac{k\lambda}{\cos\theta \times FWHM}$ และค่าคงที่ผลึก (Lattice constant) ของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่ระนาบ (111) และ (200) โดยที่ระนาบ (111) มีระยะห่างระหว่างระนาบอยู่ในช่วง 0.2395 – 0.2402 nm ที่ระนาบ (200) มีระยะห่างระหว่างระนาบอยู่ในช่วง 0.2072 – 0.2076 nm เมื่อพิจารณาขนาดของผลึกที่ระนาบ (111) มีขนาดของผลึกอยู่ในช่วง 11.10 – 19.39 Å ที่ระนาบ (200) มีขนาดของผลึกอยู่ในช่วง 7.70 – 13.73 Å ซึ่งจากตารางสรุปได้ว่าที่ระนาบ (111) ที่กำลังไฟฟ้า 150 W มีขนาดผลึกใหญ่ที่สุดนั่นคือเท่ากับ 19.39 Å โดยที่มีระยะห่างระหว่างระนาบอยู่ในช่วง 0.2402 nm ซึ่งมีความเป็นผลึกมากที่สุด และเมื่อพิจารณาค่าคงที่ผลึกที่ระนาบ (111) อยู่ในช่วง 0.4790 – 0.4803 nm ที่ระนาบ (200) มีค่าคงที่ผลึกอยู่ในช่วง 0.4145 – 0.4151 nm ซึ่งค่าคงที่ผลึกมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ G.Wei และคณะ โดยมีค่าคงที่ผลึกของโครเมียมไนไตรด์เป็น 0.417 nm

จากรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มจาก 125 W ไป 150 W ความเป็นระนาบของผลึกจะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าขณะเคลือบจะส่งผลให้พลังงานจลน์ของอะตอมโครเมียมไนไตรด์ (CrN) มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะง่ายต่อการจัดเรียงตัวของอะตอมโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ในระนาบ (111) อย่างไรก็ตามที่ กำลังไฟฟ้า 175 W และ 200 W จะเห็นได้ว่าที่ระนาบ (111) ความเป็นผลึกลดลง เนื่องจากเมื่อทำการเพิ่มกำลังไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องคุณภาพของผลึกจะมีค่าลดลง เพราะภายใต้กำลังไฟฟ้าที่สูงๆ อะตอมของโครเมียมไนไตรด์ (CrN) จะพลังงานที่สูงมาก อาจส่งผลให้เกิดการแตกออกของพันธะ เป็นผลให้มีการเสื่อมสภาพของผลึก สังเกตได้จากตารางที่ 4.1 ที่กำลังไฟฟ้า 175 W ขนาดของผลึกจะมีค่าลดลง



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังไฟฟ้า กับ ขนาดของผลึก

จากรูปที่ 4.2 เมื่อทำการวิเคราะห์ X-ray diffraction (XRD) สามารถนำค่าที่ได้มา คำนวณหาขนาดของผลึกโดยใช้สมการ $d = \frac{k\lambda}{\cos\theta \times FWHM}$ และนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับขนาดของผลึก จากกราฟพบว่า ที่ระนาบ (111) และระนาบ (200) ขนาด ของผลึกที่ กำลังไฟฟ้าต่างๆ จะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ กำลังไฟฟ้า 150 W ขนาดของผลึกจะมีขนาดที่ ใหญ่ที่สุด เมื่อกำลังไฟฟ้า 175 W ขนาดของผลึกจะมีค่าลดลง และจะสูงขึ้นครั้งอีกเมื่อกำลังไฟฟ้า เท่ากับ 200 W

ตารางที่ 4.2 ค่า Texture coefficient; $T_{c(hkl)}$ ที่ได้จากการคำนวณ

Power (w)	$T_{c(hkl)}$		
	(111)	(200)	(220)
125	1.3661	0.9220	0.7119
150	2.7560	0.9031	0.7153
175	1.5017	0.9708	0.8305
200	1.6170	0.9546	0.8508

ค่า texture coefficient; $T_{c(hkl)}$ จะถูกคำนวณเพื่อกำหนดระนาบที่โดดเด่นของการเคลือบฟิล์มโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ซึ่งสามารถนำมาเปรียบเทียบเชิงปริมาณได้ ค่า texture coefficient; $T_{c(hkl)}$ จะหาได้จากสมการ

$$T_{c(hkl)} = \frac{I_{(hkl)}/I_{0(hkl)}}{\left(\frac{1}{N}\right)[\sum N I_{(hkl)}/I_{0(hkl)}]} \quad (4.1)$$

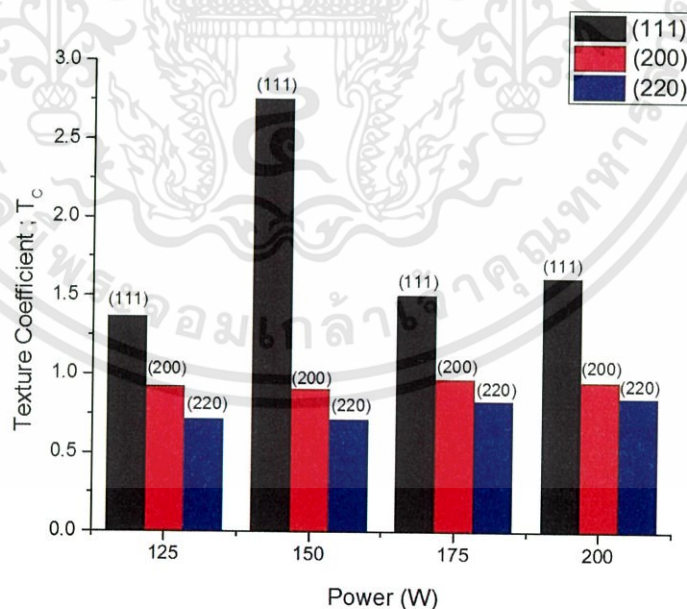
เมื่อ $T_{c(hkl)}$ คือ ค่า texture coefficient ของระนาบ (hkl)

$I_{(hkl)}$ คือ ค่าความเข้มที่ได้จากการวัด ของระนาบ (hkl)

$I_{0(hkl)}$ คือ ค่าความเข้มมาตรฐานของระนาบ (hkl) จากฐานข้อมูล JCPDS 00-011-0065

N คือ จำนวนของระนาบ

ค่า texture coefficient; $T_{c(hkl)}$ คำนวณโดยกำหนดให้ $N = 3$ ความแตกต่างของความเข้มพีคที่วัดได้โดยการวิเคราะห์ X-ray diffraction (XRD) เริ่มตั้งแต่ 20° ถึง 70° โดยที่การคำนวณค่า texture coefficient จะมีเพียงระนาบเดียวที่แสดงระนาบที่โดดเด่นโดยที่ระนาบนั้นจะมีค่า texture coefficient สูงที่สุด ในการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) บนพลาสติกชนิด ABS นั้น ค่า texture coefficient สูงสุดจะอยู่ที่ระนาบ (111) ที่กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 150 W ซึ่งได้ค่า $T_{c(hkl)} = 2.7560$ และในทางตรงกันข้ามถ้าค่า $T_{c(hkl)}$ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ นั้นหมายความว่าค่าความเป็นผลึกจะมีน้อย ส่งผลให้การเกิดระนาบมีน้อยลงไปด้วย



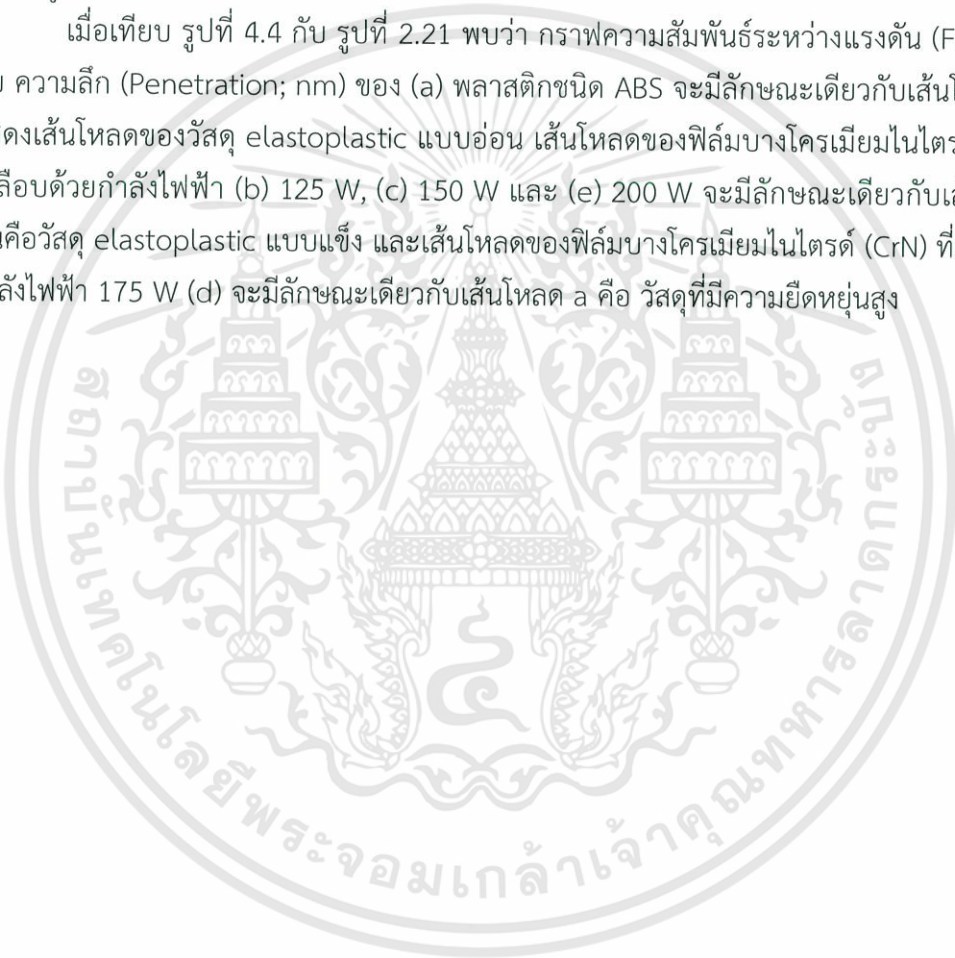
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Power (w) กับ Texture Coefficient

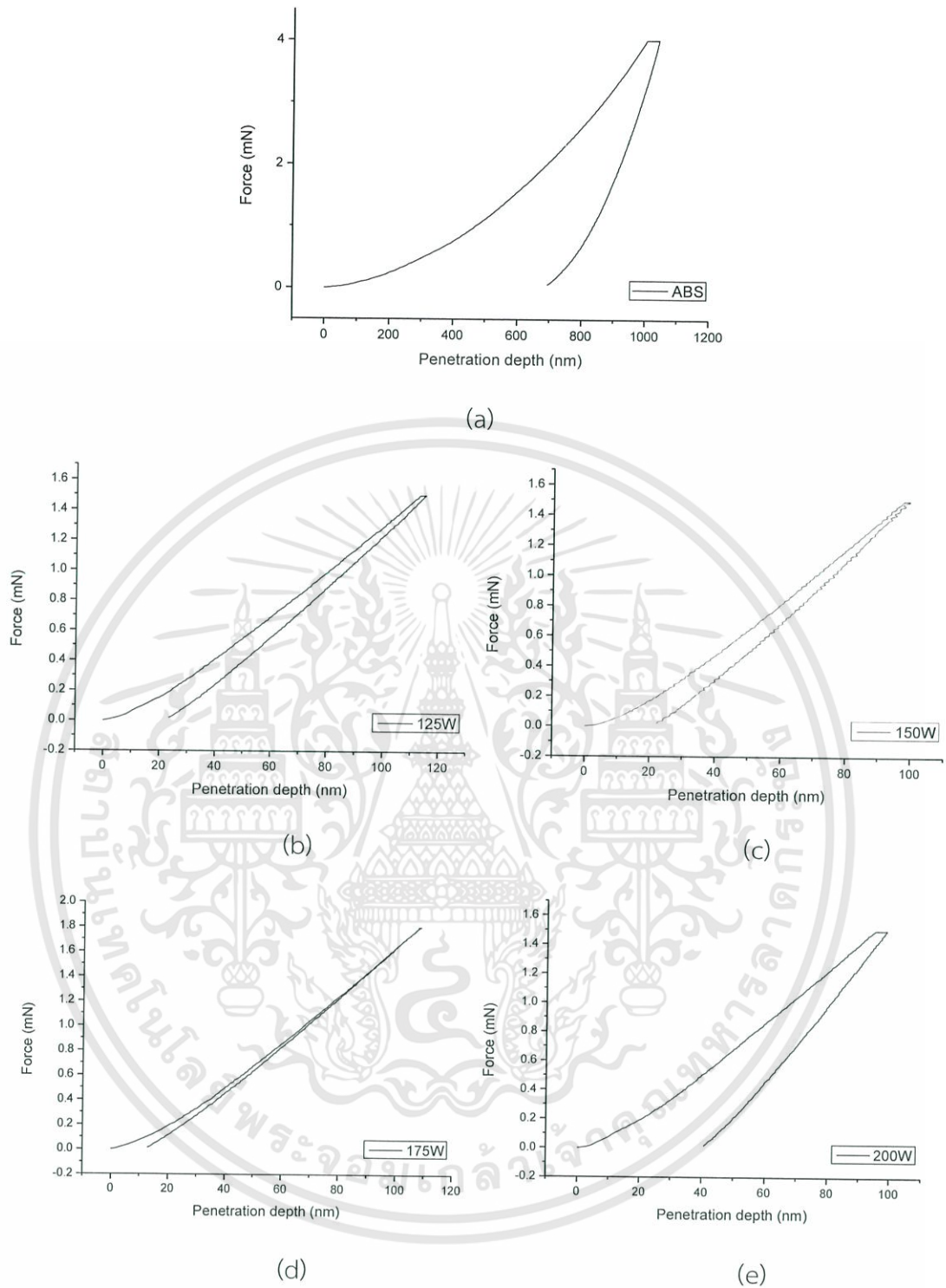
จากรูปที่ 4.3 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Power (w) กับ ค่า Texture Coefficient ที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งกราฟจะแสดงผลดังที่ได้ค่า Texture Coefficient สูงสุดเท่ากับ 2.7560 จากกราฟแท่งสีดำของกำลังไฟฟ้า 150 W ระบายที่โดดเด่นที่สุดคือระบาย (111)

4.2 ผลการวิเคราะห์ Nano Indentation Hardness

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Nano Indentation Hardness จะใช้เครื่อง CSM Instruments Switzerland ชนิด Indentation testers ในการวิเคราะห์ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS ด้วยกำลังไฟฟ้าที่ 125 W, 150 W, 175 W และ 200 W ผลที่ได้แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.4

เมื่อเทียบ รูปที่ 4.4 กับ รูปที่ 2.21 พบว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน (Force; mN) กับ ความลึก (Penetration; nm) ของ (a) พลาสติกชนิด ABS จะมีลักษณะเดียวกับเส้นโหนด C ซึ่งแสดงเส้นโหนดของวัสดุ elastoplastic แบบอ่อน เส้นโหนดของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า (b) 125 W, (c) 150 W และ (e) 200 W จะมีลักษณะเดียวกับเส้นโหนด b นั่นคือวัสดุ elastoplastic แบบแข็ง และเส้นโหนดของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 175 W (d) จะมีลักษณะเดียวกับเส้นโหนด a คือ วัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง





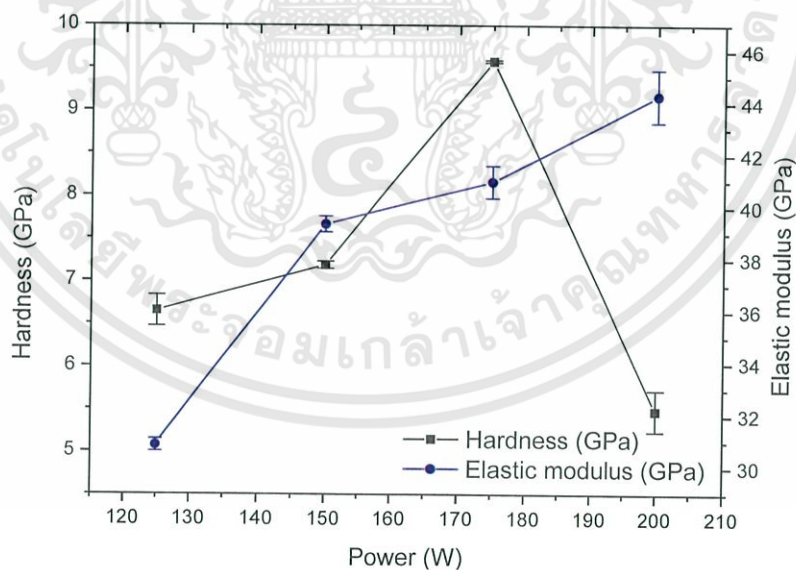
รูปที่ 4.4 ผลที่ได้จากการวัด Nano Indentation Hardness ที่แสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Force (mN) กับ Penetration (nm) ของ (a) พลาสติกชนิด ABS กับพลาสติกชนิด ABS ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ ด้วยกำลังไฟฟ้า (b) 125 W, (c) 150 W, (d) 175 W และ (e) 200 W

ตารางที่ 4.3 ค่าความแข็งที่ได้จากการวิเคราะห์ Nano Indentation Hardness

Sample	Hardness (GPa)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average	Uncertainty
ABS	0.168	0.164	0.160	0.164	0.002
125 W	6.536	6.875	6.534	6.648	0.182
150 W	7.122	7.170	7.267	7.186	0.043
175 W	9.571	9.555	9.605	9.577	0.015
200 W	5.564	5.848	5.023	5.478	0.242

ตารางที่ 4.4 ค่าElastic modulusที่ได้จากการวิเคราะห์ Nano Indentation Hardness

Sample	Elastic modulus (GPa)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average	Uncertainty
ABS	3.043	3.097	3.112	3.084	0.021
125 W	30.401	31.172	31.026	30.866	0.237
150 W	38.828	39.883	39.340	39.350	0.305
175 W	40.039	40.756	42.149	40.981	0.619
200 W	44.754	45.754	42.347	44.285	1.011



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Power (W) กับ Hardness (GPa) และ Elastic modulus (GPa)

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นถึงค่าความแข็งและค่าความยืดหยุ่นของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติก ชนิด ABS ด้วยกำลังไฟฟ้า 125 W, 150 W, 175 W และ 200 W พบว่าเมื่อมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ 125 W, 150 W และ 175 W ค่าความแข็งและค่าความยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังไฟฟ้า แต่เมื่อมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ 200 W ค่าความแข็งมีค่าลดลง ในขณะที่ค่าความยืดหยุ่นยังมีค่าสูงขึ้นตามกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นตามลำดับ

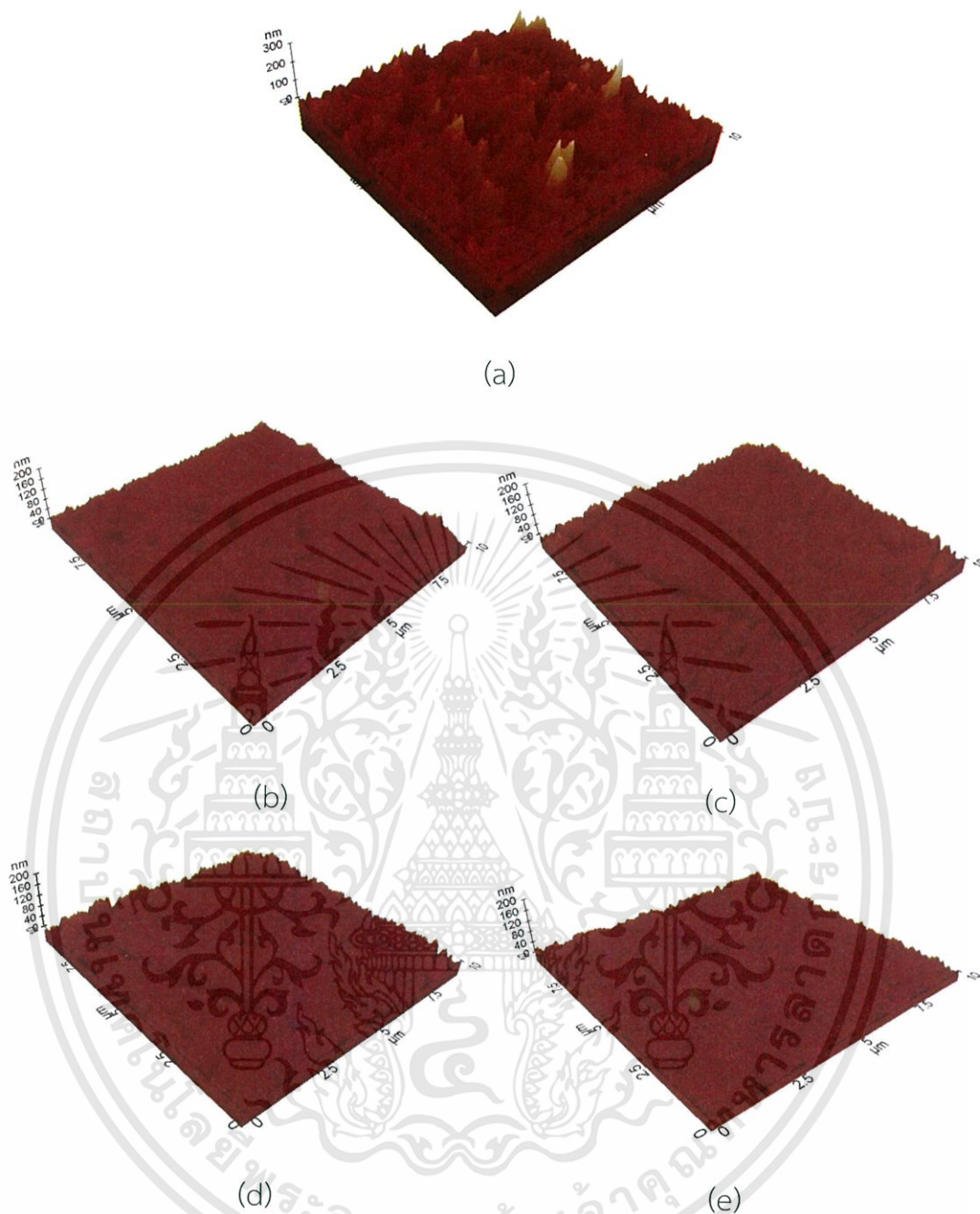
จากการทดสอบ Nano Indentation Hardness ของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS ดังรูปที่ 4.5 พบว่าที่ กำลังไฟฟ้าที่สูงมากขึ้นทำให้ค่าความแข็งของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อถึงกำลังไฟฟ้าที่ 200 W พบว่าค่าความแข็งของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) กลับมีค่าลดลง จากรายงานของ Du-Cheng Tsai และคณะ พบว่าการเคลือบฟิล์มบางที่ กำลังไฟฟ้าสูงๆ จะส่งผลให้โครงสร้างของฟิล์มบางมีความหนาแน่นมากขึ้น ความแข็งของฟิล์มจึงมากขึ้นไปด้วย อย่างไรก็ตาม หากทำการเคลือบฟิล์มบางที่ กำลังไฟฟ้าที่สูงมากจนเกินไป จะทำให้ช่องว่างระหว่างโครงสร้างฟิล์มบางขยายออกกว้างมากขึ้น เป็นผลให้โครงสร้างของฟิล์มบางมีความหนาแน่นน้อยลง และความแข็งของฟิล์มก็จะลดน้อยลงตามไปด้วย ในการทดสอบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) จะได้ค่าความยืดหยุ่น (Elastic modulus) ผลการทดสอบพบว่ายังกำลังไฟฟ้าที่ใช้เคลือบมีค่าสูงขึ้น ค่าความยืดหยุ่นก็จะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

4.3 ผลการวิเคราะห์ กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม Atomic Force Microscopy (AFM)

จากการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ลงบนพลาสติกชนิด ABS ด้วยกำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกัน คือ 125 W, 150 W, 175 W และ 200 W จากนั้นนำฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) และพลาสติกชนิด ABS ที่เป็นวัสดุรองรับมาทำการวิเคราะห์ด้วย กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม Atomic Force Microscopy (AFM) โดยกำหนดพื้นที่ที่ใช้ในการวัดมีขนาด $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ ผลที่ได้แสดงดังตาราง

ตารางที่ 4.5 ค่า Roughness ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

Sample Power	Roughness		
	Rq (μm)	Ra (μm)	Rz (μm)
ABS	0.041	0.029	0.046
125 W	0.008	0.006	0.156
150 W	0.011	0.008	0.105
175 W	0.012	0.009	0.099
200 W	0.008	0.006	0.076



รูปที่ 4.6 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของ (a) พลาสติกชนิด ABS ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS ด้วยกำลังไฟฟ้า (b) 125 W, (c) 150 W, (d) 175 W และ (e) 200 W

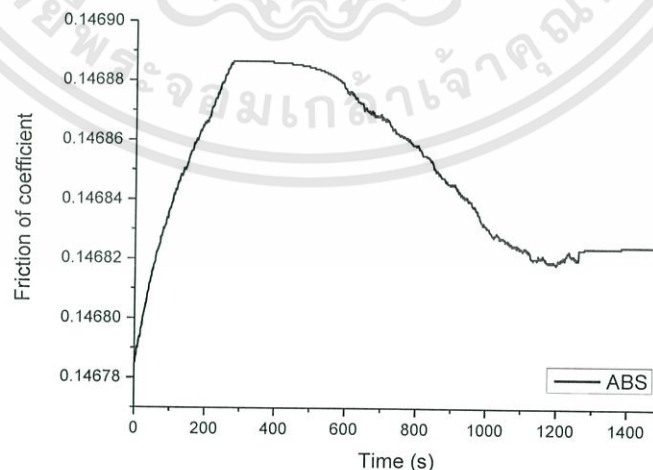
ผลจากการวิเคราะห์ กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม Atomic Force Microscopy (AFM) พบว่า ค่า Roughness โดยเฉลี่ยของพลาสติกชนิด ABS นั้น มีค่าเท่ากับ 0.029 ไมโครเมตร และค่า Roughness โดยเฉลี่ยของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS ด้วยกำลังไฟฟ้า 125 W, 150 W, 175 W และ 200 W มีค่าเท่ากับ 0.006, 0.008, 0.009 และ 0.006 ซึ่งค่าที่ได้จะไม่มี ความแตกต่างกันมากนักในแต่ละกำลังไฟฟ้า ดังตารางที่ 4 ค่าดังกล่าวทำให้ทราบว่า ความขรุขระของพลาสติกชนิด ABS มีค่าน้อยลงเมื่อทำการเคลือบด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) สอดคล้องกับรูปที่ 4.6 (a) พื้นผิวของพลาสติกชนิด ABS จะมีความขรุขระของพื้นผิวอย่างเห็นได้ชัด และดังรูปที่ 4.6 (b), (c), (d) และ (e) ซึ่งแสดงภาพพื้นผิวของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกัน เมื่อเทียบกับพื้นผิวของพลาสติกชนิด ABS ความขรุขระของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) นั้นมีน้อยกว่า นั้นหมายความว่ามีการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ลงบนพลาสติกชนิด ABS แล้วนั้น พื้นผิวของวัสดุที่ได้จะมีความเรียบมากขึ้น

4.4 ผลการวิเคราะห์ Tribology

4.4.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

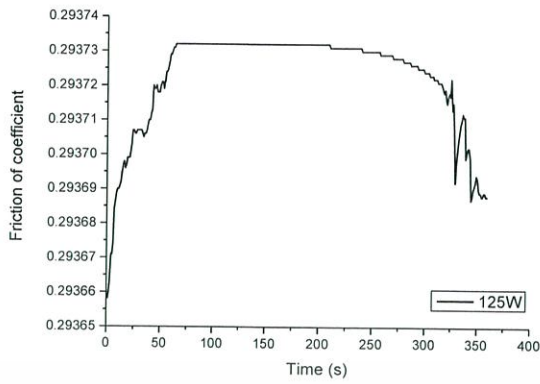
การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Tribology จะใช้เครื่องที่มีการออกแบบขึ้นมาเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางไดรโบลยีของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติก ชนิด ABS ผลที่ได้แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.7 และ 4.8

จากรูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง เวลา กับ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพลาสติกชนิด ABS โดยใช้โหลด คือ 10 N จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าสูงขึ้นในช่วงเวลา 0 ถึง 200 วินาที และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเริ่มมีค่าคงที่ที่ประมาณ 0.146 ในช่วงเวลา 200 ถึง 600 วินาที หลังจากนั้นมีการเกิด self-lubricant ซึ่งเป็นการเกิดปรากฏการณ์ที่พลาสติก ชนิด ABS มีการเกิดความร้อน ทำให้พลาสติกเกิดการหลอมตัว ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลง

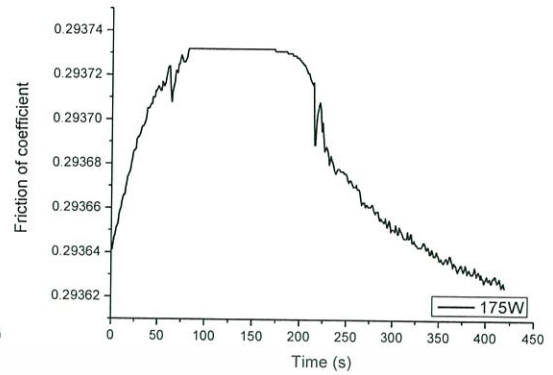


รูปที่ 4.7 ค่าที่วัดได้จากการวิเคราะห์ Tribology ซึ่งแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง เวลา กับ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ของพลาสติก ชนิด ABS โดยใช้โหลด คือ 10 N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

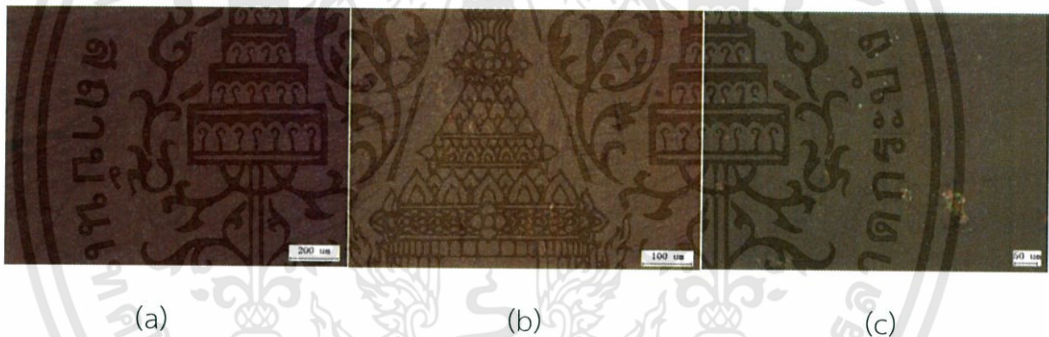
รูปที่ 4.8 ค่าที่วัดได้จากเทคนิค Tribology ที่แสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง เวลา กับ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพลาสติก ชนิด ABS เคลือบด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ ด้วยกำลังไฟฟ้า (a) 125 W และ (b) 175 W โดยใช้โหลด คือ 10 N

รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เวลา กับ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพลาสติก ชนิด ABS เคลือบด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ด้วยกำลังไฟฟ้า (a) 125 W และ (b) 175 W โดยใช้โหลด คือ 10 N พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของรูปที่ 4.8 (a) มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 0 ถึง 50 วินาที และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะเริ่มมีค่าคงที่ในช่วงเวลา 50 ถึง 200 วินาที พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของรูปที่ 4.8 (b) มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 0 ถึง 75 วินาที และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเริ่มมีค่าคงที่ในช่วงเวลา 75 ถึง 200 วินาที ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของรูปที่ 4.8 (a) และรูปที่ 4.8 (b) มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่อยู่ที่ค่า 0.293 สังเกตได้ว่ารูปที่ 4.8 (b) หลังจากช่วงเวลา 200 วินาทีเป็นต้นไป ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานทั่วไปของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) จะอยู่ที่ประมาณ 0.5 ถึง 0.8 อาจเนื่องมาจากความขรุขระของฟิล์มที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) มีค่าน้อยลง จากรายงานของ R.J. Rodriguez และคณะ ค่าความขรุขระของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) จะอยู่ที่ 0.037 ไมโครเมตร โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าเท่ากับ 0.8 เมื่อเทียบกับรายงานของ W.H. Zhang, J.H. Hsieh ที่มีค่าความขรุขระ 0.0356 ไมโครเมตร ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าเท่ากับ 0.72 อาจเพราะค่าความขรุขระที่น้อยลงจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานน้อยลงไปด้วย ซึ่งฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS จะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่น้อยมาก เมื่อเทียบกับฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ของงานวิจัยอื่นๆ

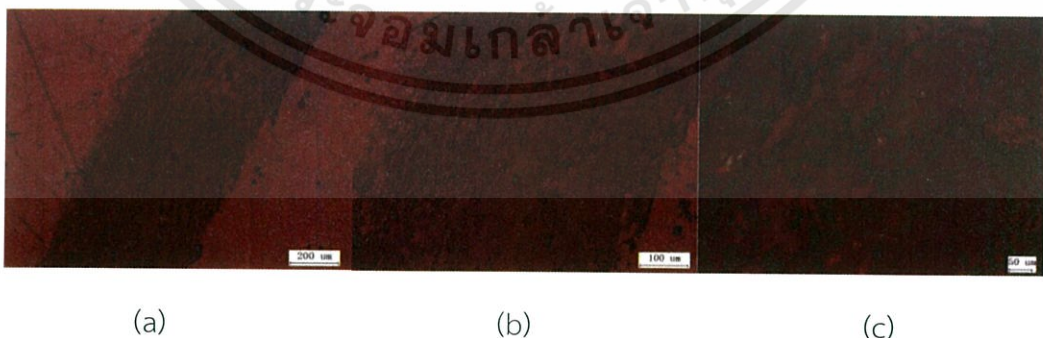
4.4.2 ผลการวิเคราะห์จากกล้อง Microscope

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Tribology ได้มีการนำชิ้นงานมาวิเคราะห์ด้วยกล้อง Microscope ผลที่ได้ แสดงดังรูปที่ 4.9, 4.10 และ 4.11

จากรูปที่ 4.9 ที่แสดงภาพจากกล้อง Microscope ของพื้นผิวพลาสติกชนิด ABS พบว่าในการวิเคราะห์ Tribology โดยใช้โหลด 10 N ทำให้เกิดการเสียดสีระหว่างพื้นผิวของพลาสติกเป็นผลให้เกิดความร้อนจนทำให้พื้นผิวบางส่วนของพลาสติกละลายและรวมเป็นเนื้อเดียวกัน สามารถเห็นได้ชัดในรูป 4.9 (b) และจากรูปที่ 4.10 ซึ่งแสดงภาพของพื้นผิวฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS ที่กำลังไฟฟ้า 125 W จากรูปดังกล่าวพบว่า ร่องรอยความเสียหายจะเห็นได้ชัดเกินกว่ารูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงภาพของพื้นผิวฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS ที่กำลังไฟฟ้า 175 W อาจเป็นฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS มีค่าความแข็งที่มากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่มากกว่าพลาสติกชนิด ABS จะพบว่าร่องรอยความเสียหายของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) สามารถเห็นได้ชัดกว่าร่องรอยความเสียหายที่ปรากฏบนพลาสติกชนิด ABS



รูปที่ 4.9 ภาพจากกล้อง Microscope ของพลาสติกชนิด ABS โดยใช้โหลด คือ 10 N ที่กำลังขยาย (a) 50X, (b) 100X และ (c) 500X



รูปที่ 4.10 ภาพจากกล้อง Microscope ของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS ด้วยกำลังไฟฟ้า 125 W โดยใช้โหลด คือ 10 N ที่กำลังขยาย (a) 50X, (b) 100X และ (c) 500X

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 พบว่า พื้นผิวของลูกบอลแบร็งที่ใช้ตกลงบนพลาสติกชนิด ABS มีร่องรอยความเสียหายของลูกบอลแบร็ง น้อยกว่าพื้นผิวของลูกบอลแบร็งที่ใช้ตกลงบนฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS จากร่องรอยความเสียหายของลูกบอลแบร็งแสดงให้เห็นว่า พื้นผิวของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) มีความแข็งแรงมากกว่าพื้นผิวของพลาสติกชนิด ABS โดยเฉพาะที่ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 175 W จากรูปที่ 4.13 (b) ร่องรอยความเสียหายของลูกบอลแบร็งที่ใช้กดกับผิวหน้าฟิล์มจะมีมากที่สุด อาจเนื่องมาจากผลการวิเคราะห์ในข้างต้น ที่พบว่าฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 175 W มีความแข็งแรงที่สุด แสดงดังตารางที่ 3.2 และดังรูปที่ 4.8 ที่แสดงฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่มากกว่าเมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพลาสติกชนิด ABS ดังรูปที่ 4.7



สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ด้วยวิธีดีซีรีแอคทีฟแมกนีตรอน-สปีดเตอริง กำหนดให้ระยะห่างระหว่างเป้าโครเมียมกับฐานวางวัสดุรองรับเท่ากับ 7 เซนติเมตร โดยมีอัตราส่วนความดันย่อยของไนโตรเจนต่อความดันรวมเป็น 30% ความดันพื้นฐานเท่ากับ 1.7×10^{-5} mbar ความดันรวมเท่ากับ 4×10^{-3} mbar ทำการเคลือบฟิล์มบางด้วยกำลังไฟฟ้า 125 W, 150 W, 175 W และ 200 W เวลาที่ใช้เคลือบทั้งหมด 120 นาที เพื่อศึกษากำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อคุณสมบัติของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ เช่น โครงสร้างของผลึก, ลักษณะพื้นผิว, คุณสมบัติเชิงกล และสมบัติทาง Tribology ของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) เพื่อนำฟิล์มบางไปประยุกต์เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1 สรุปผลวิจัย

จากผลการวิเคราะห์ X-ray diffraction (XRD) พบว่าระนาบที่โดดเด่นคือระนาบ (111) เมื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มจาก 125 W ไป 150 W ความเป็นระนาบของผลึกจะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย โดยที่ กำลังไฟฟ้า 175 W และ 200 W จะเห็นได้ว่าที่ระนาบ (111) ความเป็นผลึกลดลง และที่ กำลังไฟฟ้า 150 W ขนาดของผลึกจะมีขนาดที่ใหญ่ที่สุดนั่นคือเท่ากับ 19.39 Å ที่กำลังไฟฟ้า 175 W ขนาดของผลึกจะมีค่าลดลง ซึ่งจะสูงขึ้นอีกครั้งเมื่อกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 200 W และถ้าทำการเพิ่มกำลังไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องคุณภาพของผลึกจะมีค่าลดลงเพราะภายใต้กำลังไฟฟ้าที่สูงๆ อะตอมของโครเมียมไนไตรด์จะพลังงานที่สูงมาก อาจส่งผลให้เกิดการแตกออกของพันธะ เป็นผลให้มีการเสื่อมสภาพของผลึกได้ ในด้านของการวิเคราะห์ Nano Indentation Hardness พบว่าเมื่อมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ 125 W, 150 W และ 175 W ค่าความแข็งและค่าความยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังไฟฟ้า แต่เมื่อมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ 200 W ค่าความแข็งกลับมีค่าลดลง เพราะหากทำการเคลือบฟิล์มบางที่กำลังไฟฟ้าที่สูงมากจนเกินไป จะทำให้ช่องว่างระหว่างโครงสร้างฟิล์มบางขยายออกกว้างมากขึ้น เป็นผลให้โครงสร้างของฟิล์มบางมีความหนาแน่นน้อยลง และความแข็งของฟิล์มก็จะลดน้อยลงตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามค่าความยืดหยุ่นที่ได้ยังมีค่าสูงขึ้นตามกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อทำการวิเคราะห์ Atomic Force Microscopy (AFM) ทำให้ทราบว่า ค่าความขรุขระบนพื้นผิวของพลาสติกชนิด ABS จะมีค่าที่สูงกว่าค่าความขรุขระบนพื้นผิวของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS จากค่าที่ได้สามารถวิเคราะห์ได้ว่า การเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ ลงบนพลาสติกชนิด ABS จะทำให้พื้นผิวของวัสดุฐานรองรับมีความเรียบมากขึ้น โดยที่ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS ที่กำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกันนั้นมีค่าความขรุขระที่ใกล้เคียงกัน นั่นแสดงว่ากำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกันไม่ได้ส่งผลต่อความขรุขระของฟิล์ม จากนั้นในการวิเคราะห์สมบัติทาง Tribology ของฟิล์มพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ มีค่าเท่ากับ 0.293 และของพลาสติกชนิด ABS มีค่าเท่ากับ 0.146 จากผลวิเคราะห์ดังกล่าวนี้ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบลงบนพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิด ABS มีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพลาสติกชนิด ABS แต่อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS ยังมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ จากงานวิจัยอื่นๆ เมื่อสรุปจากผลการวิเคราะห์ที่ตั้งที่กล่าวมาของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS พบว่ากำลังไฟฟ้า 175 W เป็นกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ลงบนพลาสติกชนิด ABS มากที่สุดเมื่อเทียบกับฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 125 W, 150 W และ 200 W และด้วยค่าความแข็งของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS ด้วยกำลังไฟฟ้า 175 W มีค่าความแข็งอยู่ที่ 9.577 GPa โดยมีค่าใกล้เคียงกับเหล็กซึ่งมีความแข็งอยู่ที่ 9.8577 GPa ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ที่จะนำพลาสติกชนิด ABS ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์มาประยุกต์ใช้แทนโลหะ ที่ใช้ในการขึ้นรูปในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิเคราะห์ที่ตั้งที่กล่าวมานั้น เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS ยังมีค่าที่มากกว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพลาสติกชนิด ABS ซึ่งอาจมีข้อเสนอแนะ โดยการเพิ่มแก๊สอะเซทิลีน (C_2H_2) เข้าไปในการเคลือบฟิล์มบาง เพื่อให้อะตอมของคาร์บอนเข้าไปจับกับอะตอมของโครเมียม อาจส่งผลให้คุณสมบัติด้าน Tribology รวมทั้งสมบัติด้านอื่นๆ ของฟิล์มบางมีแนวโน้มที่ดีขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- G. Wei, A. Rar, J.A. Barnard. 2001. Composition, structure, and nanomechanical properties of DC-sputtered CrN_x ($0 \leq x \leq 1$) thin films. Surface & Coatings Technology, 398-399: 460-464
- Xiaomei Li^{1,2} • Yixi Yang^{1,2} • Dong Zhou^{1,2} • Chengtao Yang^{1,2} • Fan Feng^{1,2} • Junsong Yang^{1,2} • Qijun Hu^{1,2}. Preparation of ScAlN films as a function of power density on Si and flexible substrate by dc reactive magnetron sputtering. J. Mater. Sci. Mater. Electron. 27,171–176 (2016)
- L. Spieß. Röntgenographische Bestimmungsmethoden der Einkristallorientierung und der Textur. Illmenau (2007), p. 469.
- FU Yong - zhong (付永忠). Influence of sputtering parameters on microstructure and mechanical properties of GeSbTe films. Trans. Nonferrous. Met. Soc. China. 18, 167 - 170 (2008)
- A. Öztürk^a, K.V. Ezirmik^a, K. Kazmanlı^a, M. Urgan^a, O.L. Eryılmaz^b, A. Erdemir^b. Comparative tribological behaviors of TiN-, CrN- and MoN-Cu nanocomposite coatings. A. Öztürk et al/Tribology International 41 (2008) 49–59
- M. Uchida^a, N. Nihirab, A. Mitsuob,^{*} K. Toyodaa, K. Kubotac, T. Aizawad. Friction and wear properties of CrAlN and CrVN films deposited by cathodic arc ion plating method. M. Uchida et al. / Surface and Coatings Technology 177–178 (2004) 627–630
- J. Stallard^{*}, D.G. Teer. A study of the tribological behaviour of CrN, Graphit-iC and Dymon-iC coatings under oil lubrication. J. Stallard, D.G. Teer / Surface & Coatings Technology 188–189 (2004) 525–529
- B. Warcholinski^{*}, A. Gilewicz, Tribological properties of CrN_x coatings. B. Warcholinski, A. Gilewicz. Tribological properties of CrN_x coatings. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 37/2 (2009) 498-504.
- R.J. Rodríguez^{*}, J.A. García^a, A. Medrano^a, M. Rico^a, R. Sánchez^a, R. Martínez^a, C. Labrugère^b, M. Lahayeb, A. Guetteb. Tribological behaviour of hard coatings deposited by arc-evaporation PVD. R.J. Rodríguez et al. / Vacuum 67 (2002) 559–566
- W.H. Zhang^a, J.H. Hsieh^b. Tribological behavior of TiN and CrN coatings sliding against an epoxy molding compound. W.H. Zhang, J.H. Hsieh / Surface and Coatings Technology 130 (2000) 240-247

จักรพันธ์ อวารธิรา, สุรสิงห์ ไชยคุณ, สุคตเศศ ตุงคะสมิต. (2551). การวิจัยและพัฒนาการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรต์บนอุปกรณ์ตัดคว้านสำหรับอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร. รายงานวิจัยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิติกร นรภัยพิพากษา. 2554. เครื่องทดสอบการสีกหรือแบบพินอนดิสก์. [Online]. Available:
<http://digi.library.tu.ac.th/thesis/en/0615/title-biography.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 7
ต.ค. 58

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. Scanning Electron Microscope. [Online].
Available:
www.mfu.ac.th/center/96-scanning-electron-microscope.html. เข้าถึงเมื่อวันที่ 12
ต.ค. 58

บริษัท วีทีซัน จำกัด. Thin film deposition process. [Online]. Available:
http://www.vt-sun.com/index._content&view=article&id=10&Itemid=9&lang=en. เข้าถึงเมื่อวันที่ 17 พ.ย. 58

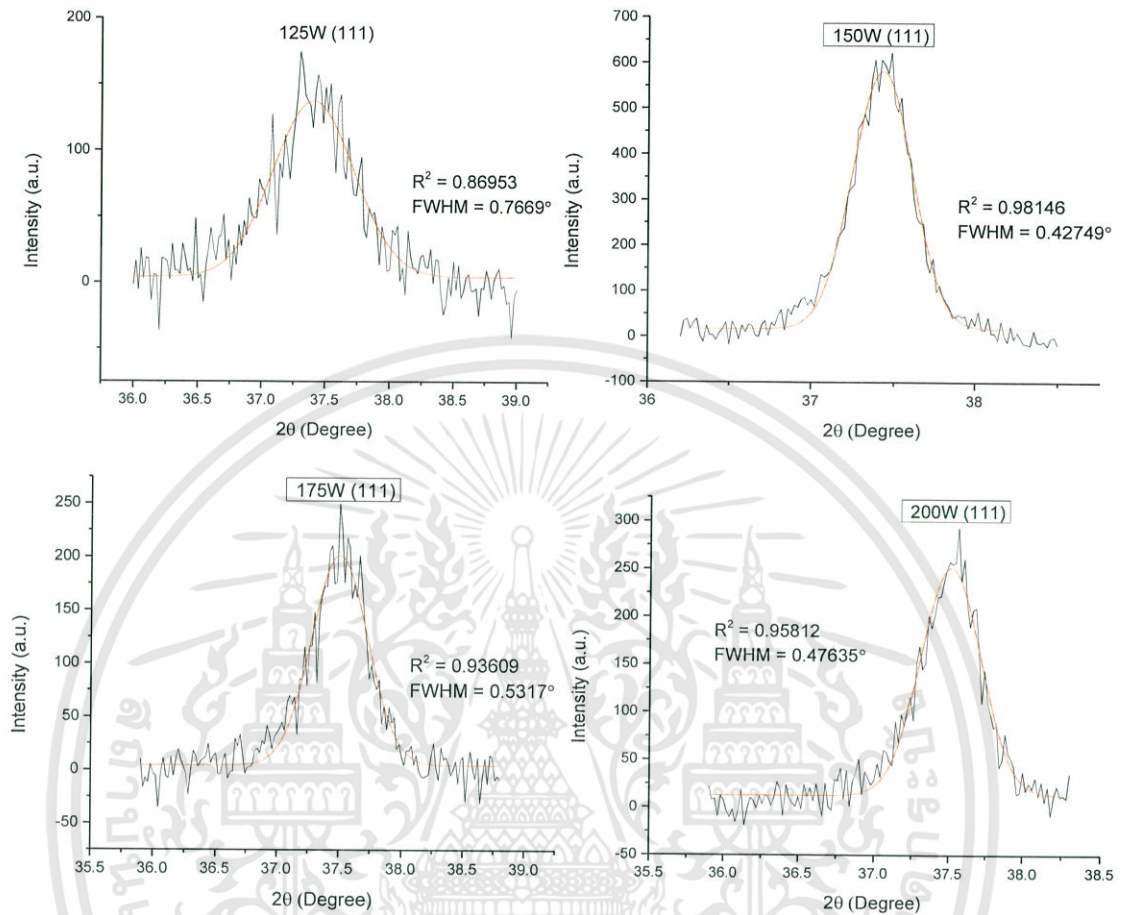
ฟิสิกส์ราชมงคล. การเลี้ยวเบนกับกฎของแบรกกส์. [Online]. Available:
<http://www.rmutphysics.com/bragg-law.html> เข้าถึงเมื่อวันที่ 7 ธ.ค. 58



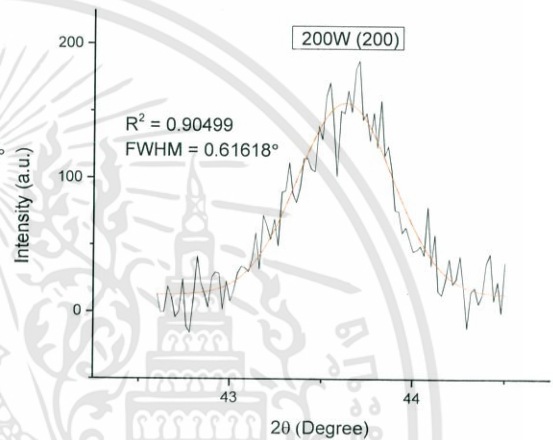
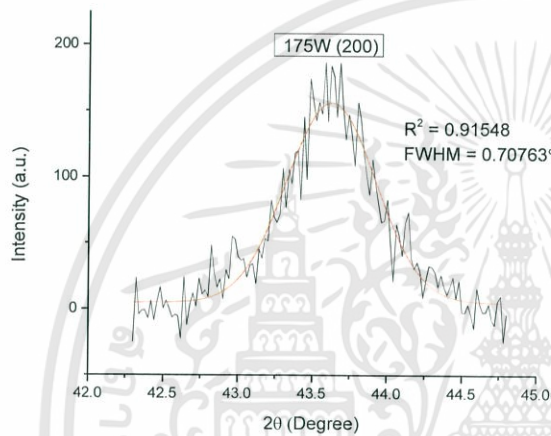
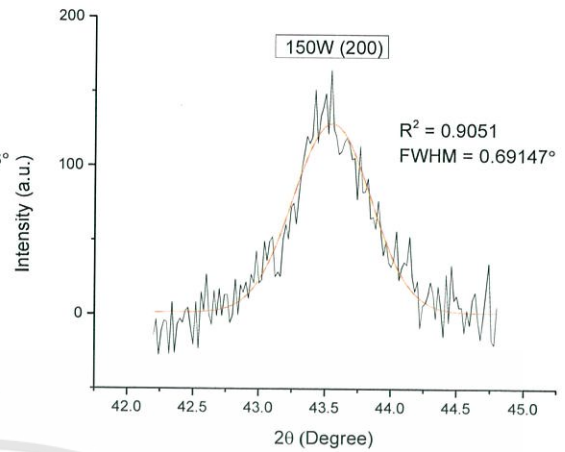
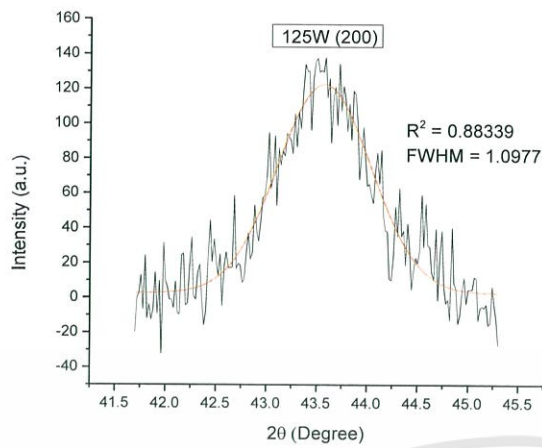


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

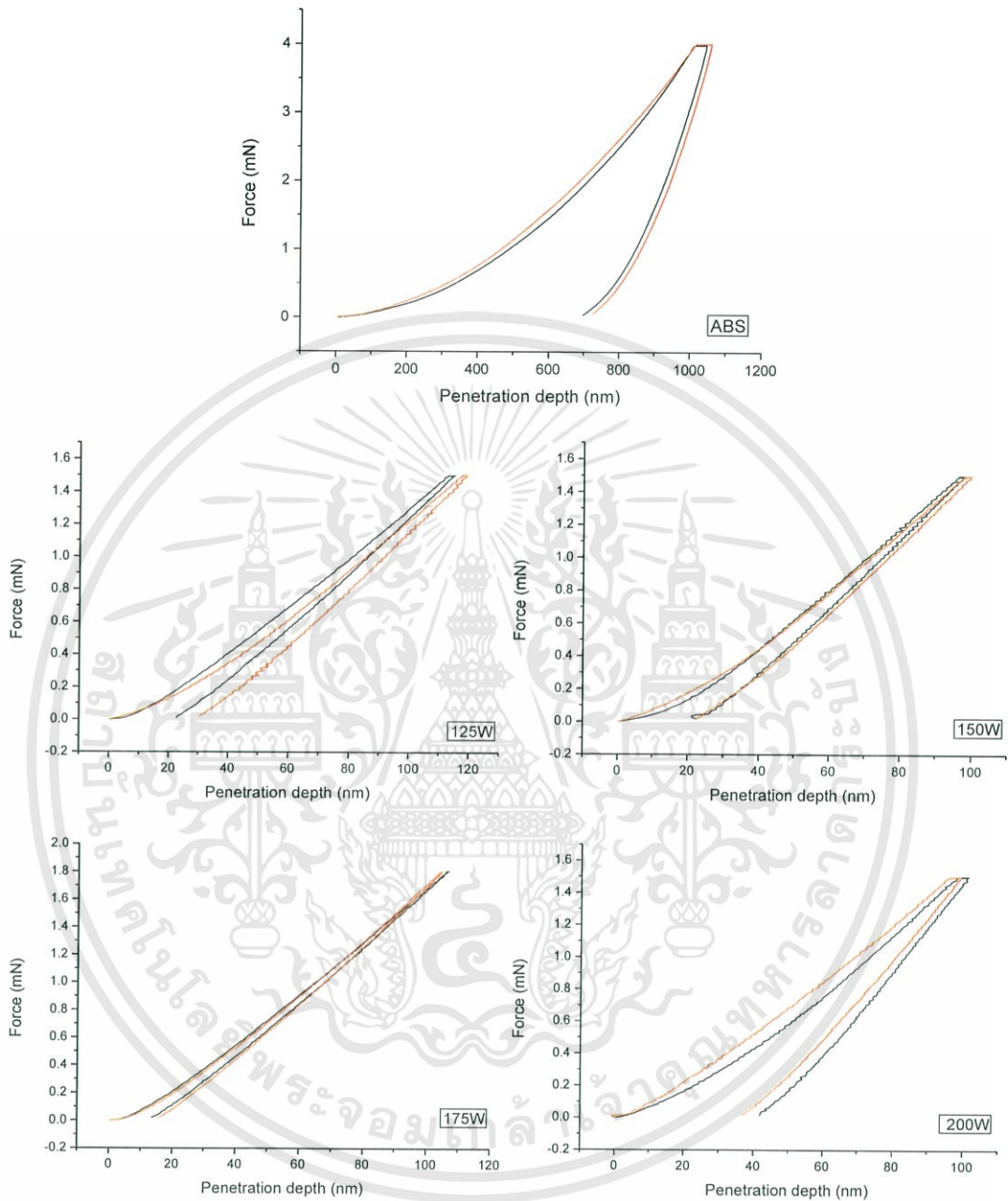


รูปที่ 1ก แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS ด้วยกำลังไฟฟ้า 125W, 150W, 175W และ 200W ที่ระนาบ 111



รูปที่ 2ก แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่เคลือบลงบนพลาสติกชนิด ABS ด้วยกำลังไฟฟ้า 125W, 150W, 175W และ 200W ที่ระนาบ 200

ภาคผนวก ข



รูปที่ 1 ข แสดงค่าที่ได้จากการวัด Nano Indentation Hardness โดยแสดงในรูปของกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง Force (mN) กับ Penetration (nm) ของพลาสติก ชนิด ABS กับ พลาสติกชนิด ABS ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางโพลีเมียมไนไตรด์ ด้วยกำลังไฟฟ้า 125W, 150W, 175W และ 200W