


การพัฒนาโลหะผสมไทเทเนียมโดยการเติมธาตุโบรอนด้วย
กระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะ
EFFECT OF BORON ADDITION IN Ti64 FABRICATED BY MIM
PROCESS ON MICROSTRUCTURE, MECHANICAL AND
TRIBOLOGICAL PROPERTIES



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF BORON ADDITION IN Ti64 FABRICATED BY MIM
PROCESS ON MICROSTRUCTURE, MECHANICAL AND
TRIBOLOGICAL PROPERTIES



MS. JIRAPA PHAISONJUMLONGSRI
MR. SUMET WIRATANACHAIMONGKHON
MS. ONAMOL POSUD

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN
PRODUCTION DESIGN AND MATERIALS ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์

การพัฒนาโลหะผสมไทเทเนียมโดยการเติมธาตุโบรอนด้วย
กระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะ

นักศึกษา

นางสาวจิราภา ไฝ่สนจำลองศรี

นางสาวสุเมธ วิรัตน์ชัยมงคล

นางสาวอรอมล โพธิ์สุด

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา

2565

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

ผศ.ดร.สุวารี ชาญุกิจมันคง

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาการพัฒนาโลหะผสมไทเทเนียมโดยการเติมโบรอน 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะและเผาผืนที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล ความต้านทานการสึกหรอ และความต้านทานการกัดกร่อน ผลการทดลองพบว่าโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมไทเทเนียมโบรอน จะเกิดการก่อตัวของสารประกอบเชิงโลหะขึ้น พบเขตต้าเฟสและแอลฟาเฟส การเติมโบรอน 0.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักส่งผลทำให้เกรนมีขนาดเล็กและส่งผลให้ความแข็งเพิ่มขึ้นจาก 324.4 HV เป็น 376.2 HV และ 431.83 HV อย่างไรก็ตามการเติมโบรอน 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักส่งผลให้เกรนมีขนาดเกรนที่ใหญ่กว่าการเติมโบรอน 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 0.057 ไมโครเมตร การเติมโบรอน 0.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะทำให้มีสัดส่วนพื้นที่ความพรุนลดลง ในขณะที่การเติมโบรอน 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะทำให้สัดส่วนพื้นที่ความพรุนมากกว่าค่าโลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลของการเติมโบรอนต่อความต้านทานการสึกหรอดีขึ้น เนื่องจากความแข็งมากขึ้นและอัตราการสึกหรอลดลง ผลการทดสอบการกัดกร่อนที่สภาวะสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักพบว่า การเติมโบรอน 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้น เนื่องจากมีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงแต่ความหนาแน่นกระแสต่ำส่งผลให้มีอัตราการกัดกร่อนต่ำ ดังนั้นการเติมโบรอนที่ทำให้โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลดีที่สุด คือ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และการเติมโบรอน 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักทำให้มีความต้านทานการกัดกร่อนดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Effect of Boron Addition in Ti64 Fabricated by MIM Process on Microstructure, Mechanical and Tribological Properties
Student	Ms. Jirapa Phaisonjumlongsri Mr. Sumet Wiratanachaimingkhon Ms. Onamol Posud
Degree	Bachelor of Engineering in Production Design and Materials Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2022
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Suwaree Chankitmunkong

Abstract

This thesis investigates the development of aluminum alloys by adding boron at concentrations of 0.5%, 1.0%, and 1.5% by weight. The alloys were formed using a metal injection molding process and then sintered at a temperature of 1350 degrees Celsius for 4 hours. The objective was to enhance the microstructure, mechanical properties, hardness, and corrosion resistance of the alloys. The experimental results showed that the addition of boron to the aluminum alloys resulted in the formation of intermetallic compounds, including beta and alpha phases. Adding 0.5% and 1.0% boron by weight led to smaller grain sizes and increased hardness from 324.4 HV to 376.2 HV and 431.83 HV, respectively. However, adding 1.5% boron by weight resulted in larger grain sizes, with a grain size of 0.057 micrometers. Adding 0.5% and 1.0% boron by weight reduced the percentage of porosity, while adding 1.5% boron by weight increased the porosity compared to the alloy with 1.0% boron. The addition of boron improved the corrosion resistance, especially with 1.0% and 1.5% boron by weight, as they exhibited higher resistance to corrosion due to their higher electrical potential and lower current density. Thus, the best combination for the microstructure and properties of the alloy was achieved with 1.0% boron by weight, while the best corrosion resistance was achieved with 1.0% and 1.5% boron by weight.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เรื่องการพัฒนาโลหะผสมไทเทเนียมโดยการเติมธาตุโบรอนด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะสามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี กลุ่มวิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้องส่งผลให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ผศ.ดร.สุวารี ชาญกิจมั่นคง อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ กลุ่มผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งความรู้ คำปรึกษา ความช่วยเหลือ ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ รวมถึงความเอาใจใส่ในทุกๆด้านของปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างดีโดยตลอด จนกระทั่งปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ดร.ชนันท์ และ ดร.หลิ ที่เอื้อเฟื้อและให้ความกรุณาช่วยในด้านการเครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการจัดเตรียมชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในปริญญาานิพนธ์นี้จะมีอาจสำเร็จลุล่วงได้หากปราศจากความอนุเคราะห์ของกลุ่มวิจัยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผงและกระบวนการพิมพ์ขึ้นรูปโลหะสามมิติที่ต้องเผ่าผนึก

ดร.พลชัย โชติปราชญ์กุลและคณะกรรมการสอบความคืบหน้าของปริญญาานิพนธ์ทุกท่าน กลุ่มผู้วิจัยกลุ่มผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง คำแนะนำตั้งแต่เริ่มต้นจนปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในส่วนของสถานที่และห้องปฏิบัติการ รวมทั้งค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและให้ความอนุเคราะห์ให้ข้อมูลในการปฏิบัติงานเป็นอย่างดี จึงปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

นางสาวจิราภา ไผ่สนจำลองศรี

นายสุเมธ วิรัตน์ชัยมงคล

นางสาวอรอมล โพธิ์สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป.....	ณ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 แผนการดำเนินงาน.....	4

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1.1 โลหะผสมไทเทเนียม	5
2.1.2 อิทธิพลของโลหะโบรอนเมื่อผสมกับโลหะไทเทเนียม	5
2.1.3 สมบัติทางกล	7
2.1.3.1 สมบัติความแข็ง (Hardness).....	7
2.1.3.2 สมบัติการต้านทานการสึกหรอ (Wear Resistance)	8
2.1.3.3 สมบัติการต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance)	8
2.2 การขึ้นรูปโลหะด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	10
2.2.1 กระบวนการฉีดขึ้นรูป	10
2.2.2 เครื่องฉีดขึ้นรูปวัสดุผง	11
2.3 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	12
2.3.1 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง หรือ Optical Microscope	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

2.3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องกราด หรือ Scanning Electron Microscope.....	13
2.4 การทดสอบความแข็ง (Hardness)	15
2.4.1 การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test)	15
2.4.2 การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell Hardness Test).....	16
2.4.3 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test).....	16
2.5 การทดสอบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน หรือ X-ray diffraction (XRD)	17
2.5.1 หลักการทำงานของเครื่อง X-ray diffraction.....	17
2.6 การทดสอบสมบัติการต้านทานการกัดกร่อน.....	18
2.6.1 ประเภทของการกัดกร่อน	18
2.7 การทดสอบสมบัติการสึกหรอ	21
2.7.1 ประเภทของการสึกหรอ.....	21
2.7.2 เครื่องมือทดสอบการสึกหรอ.....	22
2.7.3 การวัดและการวิเคราะห์	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 วัสดุ	26
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	26
3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์วัสดุ.....	26
3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการเตรียมชิ้นงาน	26
3.3 การเตรียมชิ้นงาน	27
3.4 การทดสอบความแข็ง	27
3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างวัสดุ	27
3.6 การทดสอบการสึกหรอ.....	28
3.7 การทดสอบการกัดกร่อน	29
3.7.1 การเตรียมชิ้นงาน.....	29
3.7.2 การทดสอบ.....	29
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 โครงสร้างจุลภาค.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
4.1.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมไทเทเนียม	31
4.1.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมไทเทเนียมโบรอน	31
4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค.....	33
4.3 ประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียดของโลหะผสมไทเทเนียม	34
4.3.1 อิทธิพลของการเติมโบรอนต่อการปรับสภาพเกรนละเอียดของโลหะผสมไทเทเนียม	34
4.4 สมบัติเชิงกลของโลหะผสมไทเทเนียม	35
4.4.1 สมบัติความแข็งแรงเมื่อปริมาณโบรอนต่างกัน	35
4.4.2 สมบัติความต้านทานการสึกหรอเมื่อปริมาณโบรอนต่างกัน	36
4.5 ความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมไทเทเนียม	40
4.5.1 ความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมไทเทเนียมด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า	40
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	43
5.2 ข้อเสนอแนะ	43
เอกสารอ้างอิง	45
ภาคผนวก	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	4
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการทดสอบการสีกหรือ	31
ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์จากกราฟ Polarization.....	42



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	แผนภาพ EBSD	6
รูปที่ 2.2	ค่าความแข็งเฉลี่ยระดับจุลภาคและระดับมหภาค	7
รูปที่ 2.3	กราฟทดสอบความแข็ง.....	7
รูปที่ 2.4	แสดงรอยความเสียหายหลังการทดสอบการสึกหรอ	8
รูปที่ 2.5	กราฟทดสอบการกัดกร่อน.....	9
รูปที่ 2.6	เส้นโค้งโพลาริเซชันของโลหะไทเทเนียม	9
รูปที่ 2.7	ผลวิเคราะห์จากกราฟ Polarization	11
รูปที่ 2.8	แผนภาพกระบวนการขึ้นรูป Metal Injection Molding (MIM)	11
รูปที่ 2.9	เครื่อง Metal Injection Molding (MIM).....	12
รูปที่ 2.10	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	12
รูปที่ 2.11	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องกราด.....	13
รูปที่ 2.12	หลักการทํางาน Scanning Electron Microscope (SEM).....	13
รูปที่ 2.13	การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระจายกลับ	14
รูปที่ 2.14	ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EBSD.....	15
รูปที่ 2.15	การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์	15
รูปที่ 2.16	การทดสอบความแข็งแบบ Rock well Hardness Test.....	16
รูปที่ 2.17	การทดสอบความแข็งแบบ Vickers Hardness Test	16
รูปที่ 2.18	เครื่องทดสอบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน	17
รูปที่ 2.19	หลักการทํางานของ X-ray diffraction	17
รูปที่ 2.20	การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ	18
รูปที่ 2.21	การกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์.....	19
รูปที่ 2.22	การกัดกร่อนแบบช่องแคบ.....	19
รูปที่ 2.23	การกัดกร่อนแบบเป็นหลุม.....	19
รูปที่ 2.24	การกัดกร่อนตามขอบเกรน.....	20
รูปที่ 2.25	การผุกร่อนแบบเลือก.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.26 การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ	21
รูปที่ 2.27 Stress Corrosion.....	21
รูปที่ 2.28 การทดสอบการสึกหรอแบบรับเบิลวิ.....	23
รูปที่ 2.29 การทดสอบการสึกหรอแบบ Pin-on-Disk.....	23
รูปที่ 2.30 การทดสอบการสึกหรอแบบ Block-on-ring	24
รูปที่ 2.31 การทดสอบการสึกหรอแบบ Thrust Washer test.....	24
รูปที่ 2.32 การทดสอบการสึกหรอแบบ Four-ball.....	25
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมไทเทเนียมที่กำลังขยาย x250	30
รูปที่ 4.2 ผลการทดลองแสดงทิศทางการวางตัวของผลึก	31
รูปที่ 4.3 ผลการทดลองแสดงขนาดของเกรน	32
รูปที่ 4.4 ผลการทดลองแสดงสัดส่วนพื้นที่ความพรุน	32
รูปที่ 4.5 ผลการทดลองแสดงขนาดเฉลี่ยของสารประกอบเชิงโลหะ	33
รูปที่ 4.6 ผลการทดลองแสดงสัดส่วนพื้นที่ของสารประกอบเชิงโลหะ	33
รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนโดยใช้รังสีเอ็กซ์	34
รูปที่ 4.8 ผลการทดลองความแข็งของโลหะผสมไทเทเนียม	35
รูปที่ 4.9 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายกับระยะเวลาทดสอบภายใต้โหลด 5 นิวตัน.....	36
รูปที่ 4.10 แสดงรอยการสึกหรอภายใต้โหลด 5 นิวตัน ที่กำลังขยาย x100	37
รูปที่ 4.11 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายใต้โหลด 10 นิวตัน ที่กำลังขยาย x100.....	39
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียกับเปอร์เซ็นต์โบรอนภายใต้โหลด 5 และ 10 นิวตัน	39
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอกับเปอร์เซ็นต์โบรอนภายใต้โหลด 5 และ 10 นิวตัน.....	40
รูปที่ 4.15 เส้นโค้งโพลาริเซชัน	41

บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัสดุประสมสังค์ และขอบเขตการศึกษาของปริญญาโท เรื่อง การพัฒนาโลหะผสมไทเทเนียมโดยการเติมธาตุโบรอนด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะ ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา
2. วัตถุประสงค์ของการศึกษา
3. ขอบเขตปริญญาโท
4. ขั้นตอนการดำเนินงาน
5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ
6. แผนการดำเนินงาน

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไทเทเนียมเป็นโลหะที่หลายอุตสาหกรรมให้ความสนใจ เพราะมีค่าสัดส่วนระหว่างความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูงและมีความทนทานต่อสารเคมี ไทเทเนียมเป็นธาตุที่พบได้มากและสามารถเกิดปฏิกิริยากับธาตุอื่นได้ง่าย จึงไม่พบในรูปไทเทเนียมบริสุทธิ์ตามธรรมชาติ ไทเทเนียมมีความสำคัญในภาคอุตสาหกรรมอย่างมากมีการนำไปใช้งานแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อาทิเช่น อุตสาหกรรมอากาศยาน, อุตสาหกรรมรถยนต์, อุตสาหกรรมทางการแพทย์ ฯลฯ ไทเทเนียมมีหลากหลายเกรดขึ้นอยู่กับการใช้งานโดยสามารถแบ่งเกรดได้ออกเป็นกลุ่มใหญ่ดังนี้ เกรด 1-4 จะมีส่วนผสมของไทเทเนียมอยู่ที่ 99% ตั้งแต่เกรด 5 ขึ้นไปจะผสมโลหะอื่นเข้าไปด้วย Ti-6Al-4V หรือโลหะผสมไทเทเนียม (เกรด 5) เป็นเกรดที่มีความแข็งแรงที่สูงและมีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนจึงนิยมนำไปเป็นวัสดุปลูกฝังในร่างกาย จากที่กล่าวมาวัสดุโลหะผสมไทเทเนียมมีการใช้งานที่หลากหลาย อย่างไรก็ตามหากใช้โลหะผสมไทเทเนียมไปเป็นเวลานานวัสดุย่อมมีการเสื่อมสภาพ จึงไม่เหมาะกับการนำไปใช้งานที่ต้องปลูกฝังในร่างกายเพราะในการผ่าตัด เพื่อเปลี่ยนวัสดุจะมีต้นทุนที่สูงและผู้ใช้เองก็ไม่ทราบถึงสภาพของวัสดุที่ใช้มาเป็นระยะเวลาอันยาวนาน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาสมบัติของโลหะผสมไทเทเนียมเกรดนี้ให้มีโครงสร้างจุลภาคที่มีเกรนละเอียดเพื่อช่วยสมบัติทางกลและสมบัติการนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น ความแข็งแรง ความต้านทานการสึกหรอ ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน ซึ่งส่งผลทำให้วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้นทำวัสดุทนทานต่อการใช้งานมากยิ่งขึ้น

โครงการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นพัฒนาโลหะผสมไทเทเนียมเกรด 5 โดยการเติมโบรอนขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะ เพื่อศึกษาอิทธิพลของการเติมโลหะโบรอนต่อประสิทธิภาพการปรับปรุงสภาพของเกรนละเอียดซึ่งมีผลทำให้สมบัติทางกลดีขึ้น เช่น ความแข็งแรงของชิ้นงาน ความสามารถในการต้านทานการสึก

หรือ และความสามารถทนทานต่อการกัดกร่อน ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาโลหะไทเทเนียมทำให้เกิดโครงสร้างจุลภาคที่เหมาะสมเพื่อตอบสนองต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมสมัยใหม่

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเมื่อเติมโบรอนในโลหะผสมไทเทเนียมจะช่วยปรับสภาพเกรนละเอียด และสามารถช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ได้ เช่น ความแข็ง ความต้านทานการสึกหรอ และความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน เนื่องจากการเติมโบรอนส่งผลให้เกิดการก่อตัวของอนุภาคแข็งไทเทเนียมโบไรด์ ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียดในโลหะผสมไทเทเนียม เกรนละเอียดมากขึ้นจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกลได้ เช่น ทำให้ความแข็งของไทเทเนียมเพิ่มขึ้น ทำให้มันมีความทนทานต่อการสึกหรอและการสึกกร่อนเพิ่มขึ้น อีกทั้งในแง่ของอุณหภูมิโบรอนช่วยเพิ่มความทนทานต่อความร้อนของไทเทเนียม ทำให้สามารถใช้งานในเงื่อนไขที่มีอุณหภูมิสูงได้

เนื่องจากกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะ หรือ Metal Injection Molding (MIM) เป็นกระบวนการการผลิตชิ้นงานโลหะที่ใช้วัสดุโลหะผสมผสานกับพอลิเมอร์ โดยใช้กระบวนการฉีดระดับโลหะที่มีรูปร่างซับซ้อน วัสดุผสมจะถูกอัดรีดและทำให้เป็นส่วนผสมเม็ด ซึ่งพร้อมที่จะป้อนเข้าเครื่องสำหรับการฉีดขึ้นรูป การนำไปใช้งานโดยมากแล้วจะพบในกลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์และกลุ่มอุตสาหกรรมการแพทย์ ซึ่งกระบวนการผลิตนี้สามารถผลิตได้ในปริมาณที่มากอีกทั้งการขึ้นรูปแบบ MIM ยังได้ชิ้นงานดิบ หรือ Green Body ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เบื้องต้นที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดจริงเล็กน้อย ซึ่งต่อมาจะหดตัวลงจนได้ตามขนาดที่ต้องการเมื่อผ่านกระบวนการกำจัดวัสดุประสาน (Debinding) และกระบวนการเผาผนึก (Sintering) ในขั้นตอนสุดท้าย ข้อดีของกระบวนการผลิตแบบ Metal Injection Molding คือสามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนสูงและสามารถผลิตได้ในจำนวนมากต่อรอบการผลิต แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตนี้ข้อจำกัดคือมีต้นทุนที่สูง เนื่องจากแม่พิมพ์ที่ใช้ในการผลิตจะต้องเปลี่ยนทุกครั้ง หากจะเปลี่ยนรูปแบบชิ้นงานโดยส่วนมากมักนำมาใช้ในเชิงการพัฒนาวัสดุหรือใช้ในการผลิตวัสดุที่ต้องการผลิตเป็นจำนวนมาก

1.2 วัตถุประสงค์ของการทำวิจัย

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลการเติมโบรอนที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล (ความแข็ง ความต้านทานการสึกหรอ) และความต้านทานการกัดกร่อนในโลหะผสมไทเทเนียมเกรด 5
2. เพื่อศึกษาผลของการเติมผงโบรอนในการปรับสภาพเกรนละเอียดในโลหะผสมไทเทเนียมเกรด 5
3. เพื่อพัฒนาโลหะผสมไทเทเนียมเกรด 5 ให้มีโครงสร้างจุลภาค คุณสมบัติทางกลที่ดี และมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาอิทธิพลการเติมโบรอน 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ในโลหะผสมไทเทเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กระบวนการเผาขึ้นงานของโลหะผสมไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมที่เติมโบรอน ที่อุณหภูมิ 1,350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
3. วิเคราะห์การปรับสภาพเกิดละเอียด (Grain Refinement) และการเกิดสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic)
4. ทดสอบสมบัติทางกลและสมบัติด้านต่าง ๆ ได้แก่ ทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Testing) ความต้านทานการสึกหรอ (Wear Testing) และความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Testing) ด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Techniques)
5. วิเคราะห์และอภิปรายผลของโครงสร้างจุลภาคสมบัติด้านต่าง ๆ และสรุปผลการทดลอง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เตรียมชิ้นงานตัวอย่างโดยใช้ผงไทเทเนียมเกรด 5 ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 45 ไมโครเมตร ผงโบรอนบริสุทธิ์ 95 เปอร์เซ็นต์ โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 2 ไมโครเมตร และผสมกันเพื่อผลิตชิ้นงานตัวอย่างที่มีโบรอน 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วผลิตโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะจากนั้นทำการกำจัดตัวประสาน (Debinding) ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เพื่อเข้าสู่กระบวนการเผาขึ้นงานเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 1,350 องศาเซลเซียส
2. นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาทำการตัดชิ้นงานและเตรียมผิวสำหรับการวิเคราะห์
3. นำชิ้นงานมาศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope; OM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electronic microscopy; SEM) และด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Electron Backscatter Diffraction; EBSD)
4. วิเคราะห์และระบุชนิดของการเกิดสารประกอบเชิงโลหะด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer; XRD)
5. ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ได้แก่ ทดสอบความแข็ง (Hardness Testing) และความต้านทานการสึกหรอ (Wear Testing) และความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Testing)
6. วิเคราะห์และอภิปรายผลของโครงสร้างจุลภาคต่อสมบัติด้านต่าง ๆ และสรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พัฒนาโลหะผสมไทเทเนียมให้มีโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลที่ดี ที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในอนาคตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สามารถพัฒนาโลหะผสมไทเทเนียมให้มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอมมากขึ้นและทำให้วัสดุแข็งแรงมีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากขึ้น
3. ให้ทราบถึงกระบวนการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของเกรนทำให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้นด้วยการเติมธาตุที่จะช่วยส่งผลต่อสมบัติทางกลและสมบัติความต้านทานการกัดกร่อน
4. เพื่อเป็นแนวทางสำหรับผู้สนใจจะศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการผลิตขึ้นรูปโลหะและวิธีการพัฒนาคุณสมบัติของโลหะผสมไทเทเนียมเพื่อให้ตอบโจทย์ทางการแพทย์

1.6 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ. 2565					พ.ศ. 2566				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย	พ.ค.
1. ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง										
2. รวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง										
3. กำหนดวัตถุประสงค์ ขอบเขต และผลที่คาดว่าจะได้รับ										
4. จัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง										
5. เตรียมชิ้นงานตัวอย่าง										
6. นำชิ้นงานไปทำการทดสอบและทำการวิเคราะห์										
7. วิเคราะห์ผลการทดลอง										
8. สรุปผลการทดลอง										
9. เรียบเรียงเนื้อหาและจัดทำรูปเล่มปริญญาานิพนธ์										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาโลหะไทเทเนียมผสมด้วยการเติมโลหะโบรอนด้วยกระบวนการการฉีดขึ้นรูปโลหะมีความจำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องอันประกอบด้วย ทฤษฎีการขึ้นรูปโลหะด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป ศึกษาอิทธิพลของโลหะโบรอนเมื่อผสมกับโลหะไทเทเนียม การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การทดสอบความแข็ง การทดสอบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน การทดสอบสมบัติการต้านทานการกัดกร่อน และการทดสอบสมบัติการสึกหรอของชิ้นงาน

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 โลหะผสมไทเทเนียม

โลหะผสมไทเทเนียม (Ti-6Al-4V) หรือ เกรด 5 จัดเป็นโลหะผสมที่มีความแข็งแรงสูง ความต้านทานการกัดกร่อนสูง ความเป็นพิษต่ำ สามารถทำการขึ้นรูปได้ง่าย และความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อทางชีวภาพสูงเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น ๆ เนื่องจากเป็นโลหะผสมชนิดแอลฟาและเบต้า ทำให้มีความแข็งแรงสูง จึงเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในทางการแพทย์ อุตสาหกรรมทั่วไป เช่น การบิน อวกาศ เรือ เป็นต้น [20]

2.1.2 อิทธิพลของโลหะโบรอนเมื่อผสมกับโลหะไทเทเนียม

จากงานวิจัยของ Orley Milagres Ferri และคณะ [1] ทำการศึกษาวิจัยพบว่าการเติมโบรอนในโลหะ Ti-6Al-4V ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะ (MIM) ช่วยในการปรับแต่งโครงสร้างจุลภาคอย่างมีนัยสำคัญโดยเปลี่ยนโครงสร้างจากแลมellar เป็นโครงสร้างแบบสัณฐานอีกทั้งยังพบ α colonies และ α grains ซึ่งได้รับการยืนยันจากการทดลองการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนแบบกระจายกลับ (EBSD) อีกทั้งยังค้นพบอนุภาค ไทเทเนียมโบไรด์ของเกรนทำให้รูพรุนของชิ้นงานและขนาดของเกรนลดลง

จากงานวิจัยของ M.J. Bermingham และคณะ [7] ทำการศึกษาวิจัยพบการเติมโบรอนในโลหะไทเทเนียมเกรด 5 ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคอย่างมีนัยสำคัญมีการปรับแต่งขนาดเกรนและเฟสเบต้า และยังพบอนุภาคไทเทเนียมโบไรด์ อีกทั้งยังพบ Intermetallic การกระจายตัวอยู่ทั้งโครงสร้างจุลภาคการมีอยู่ของไทเทเนียมโบไรด์ และ Intermetallic ช่วยเพิ่มเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาของเบต้าเกรน ทำให้เกิดนิวเคลียสของเฟสอัลฟา

จากงานวิจัยของ V.M. Imayev และคณะ [8] ทำการศึกษาวิจัยพบว่าการเติมโบรอนในปริมาณ 0.1–2 % โดยน้ำหนักส่งผลให้โครงสร้างจุลภาค และสมบัติเชิงกลของไททาเนียมอัลลอยด์และ Ti-6.5Al-3.3Mo พบการเกิดไทเทเนียมโบไรด์อยู่ตามขอบของเบต้าเกรนและแอลฟาเกรนทำให้โครงสร้างจุลภาคมีเนื้อที่ละเอียดมาก

จากงานวิจัยของ Jun Zhu และ Akira Kamiya [9] ทำการศึกษาวิจัยพบว่าการเติมโบรอนบนโลหะไทเทเนียมเกรด 5 ในปริมาณเล็กน้อยทำให้เกิดการปรับแต่งโครงสร้างทางจุลภาคมีการปรับปรุงคุณสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

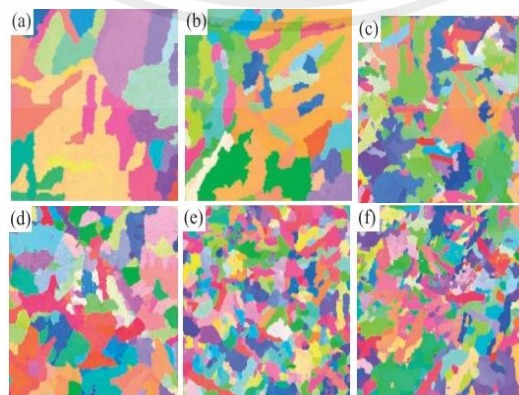
เชิงกลอย่างมีนัยสำคัญมีการพบ ไทเทเนียมโบไรด์ส่งผลให้ความเหนียวต่อแรงดึงมีค่าสูงขึ้น เป็นผลมาจากโบไรด์ที่ตกตะกอนที่ขอบเบต้า จากการทดสอบแรงดึงพบว่าไทเทเนียมที่เติมโบรอนสามารถรับแรงดึงได้มากขึ้น

จากงานวิจัยของ J.H. Luan และคณะ [10] ทำการศึกษาวิจัยพบว่าการเติมโบรอนมีผลการโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลเมื่อมีการขึ้นรูปโลหะแบบฉีดบนโลหะไทเทเนียมเกรด 5 ในสภาวะความร้อนที่แตกต่างกันการเติมโบรอนมีความสามารถในการควบคุมเกรนละเอียดของเฟสอัลฟา และเฟสเบต้าจะปรับความเหนียวของโลหะไทเทเนียมเกรด 5 ความเหนียวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงเป็นผลมาจากการแตกแยกของอนุภาคไทเทเนียมโบไรด์ ขนาดและการเรียงตัวของไทเทเนียมโบไรด์มีผลต่อเกรนของเฟสแอลฟา และเฟสเบต้าซึ่งมีบทบาทในการควบคุมคุณสมบัติเชิงกลของโลหะไทเทเนียมเกรด 5

จากงานวิจัยของ S.A. MANTRI และคณะ [11] มีการศึกษาผลของการเติมโบรอนในโลหะผสมทางการแพทย์ Ti-13Nb-13Zr (TNZ) พบว่ามีความเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเมื่อเติมโบรอน 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักพบว่าในแง่ของสัณฐานวิทยาและขนาดของอนุภาคอัลฟาจะก่อนให้เกิดอนุภาคไทเทเนียมโบไรด์ด้วยกระบวนการเลเซอร์พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ TNZ+0.5B มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น เช่น ความแข็งแรงและการต้านทานการสึกหรอที่ดีขึ้น

จากงานวิจัยของ Yu Yang และคณะ [12] จากการศึกษาผลกระทบของการเติมโบรอน 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักในการขึ้นรูปแบบหล่อของโลหะผสมไทเทเนียมเกรด 5 เมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจะพบเฟสไทเทเนียมโบไรด์ เกิดขึ้นขอบเขตเกรนเบต้าเมื่อนำโลหะผสมไทเทเนียมเกรด 5 มาเปรียบเทียบกับโลหะผสมไทเทเนียมที่เติมโบรอนเข้าไปพบว่าเกรนเบต้ามีเกรนที่ละเอียดมากขึ้น อีกทั้งยังลดความหนาของแอลฟาแลเมลลาและยังส่งผลต่อสมบัติทางกลโดยทำให้ความแข็งแรงและความเหนียวของโลหะสูงขึ้นเป็นผลมาจากการเกิดอนุภาคไทเทเนียมโบไรด์

จากงานวิจัยของ Jung-ho CHOE และคณะ [21] ทำการศึกษาวิจัยพบว่าการเติมโบรอนในโลหะผสมไทเทเนียมทำให้เกิดการก่อตัวของอนุภาค TiB ซึ่งขัดขวางการเจริญเติบโตของเกรนทำให้เกรนละเอียดขึ้น เพิ่มสมบัติเชิงกล โดยพบว่า การเติมโบรอนในโลหะผสมไทเทเนียมขนาดของเกรนมีความละเอียดมากกว่าโลหะผสมไทเทเนียม โดยในงานวิจัยนี้ใช้โบรอนในปริมาณ 0.03 0.06 0.12 0.24 และ 0.40 wt% พบว่าการเติมโบรอน 0.24 wt% ทำให้เกรนมีความละเอียดมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.1



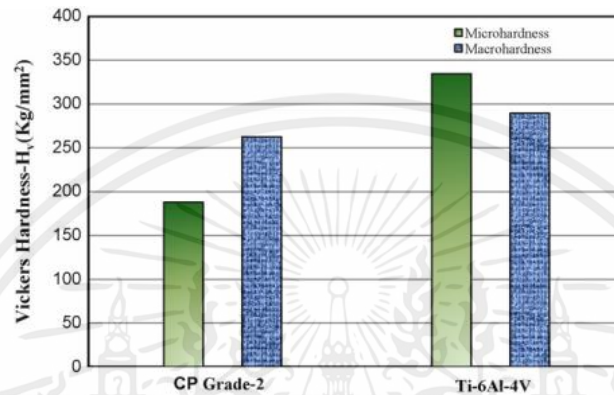
รูปที่ 2.1 แผนภาพ EBSD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 สมบัติทางกล

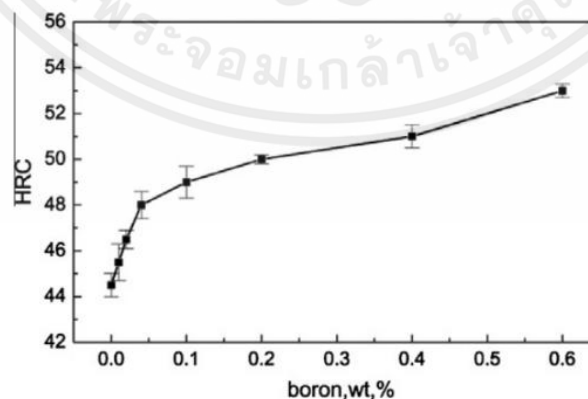
2.1.3.1 สมบัติความแข็ง (Hardness)

จากงานวิจัยของ N. Poondla และคณะ [23] ทำการศึกษาความแข็งของโลหะไทเทเนียม (Grade-2) และโลหะผสมไทเทเนียม (Ti-6Al-4V) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 พบว่าโลหะผสมไทเทเนียม (Ti-6Al-4V) มีความแข็งสูงกว่าโลหะไทเทเนียม (Grade-2) เนื่องจากการมีอยู่ของอะลูมิเนียมในโลหะผสมไทเทเนียมที่ช่วยทำให้แอลฟาเสถียรและเสริมความแข็งของแอลฟาเฟส ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงความแข็ง และความสามารถในการชุบแข็ง



รูปที่ 2.2 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยระดับจุลภาคและระดับมหภาค [23]

จากงานวิจัยของ Wang Xiang และคณะ [19] ได้ศึกษาผลกระทบของการเติมอนุภาคโบรอนเข้าไปใน TiC/Ti-6Al-4V ในแง่ของคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างทางจุลภาคซึ่งพบว่า ความแข็งของโลหะไทเทเนียมจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเติมปริมาณโบรอนมากขึ้นตามน้ำหนักที่เพิ่มเข้าไปโดยผลงานวิจัยได้กำหนดปริมาณการเติมโบรอนในช่วง 0.0-0.6 wt% โดยเมื่อเติมโบรอนเข้าไปแล้วความแข็งจะเพิ่มขึ้นซึ่งเห็นได้ชัดเจนจากโลหะไทเทเนียมที่ไม่ได้เติมโบรอนมีค่าความแข็งอยู่ที่ 44 HRC และเมื่อเติมโบรอนเข้าไป 0.1 wt% ค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นมาเป็น 48 HRC ดังแสดงในรูปที่ 2.2

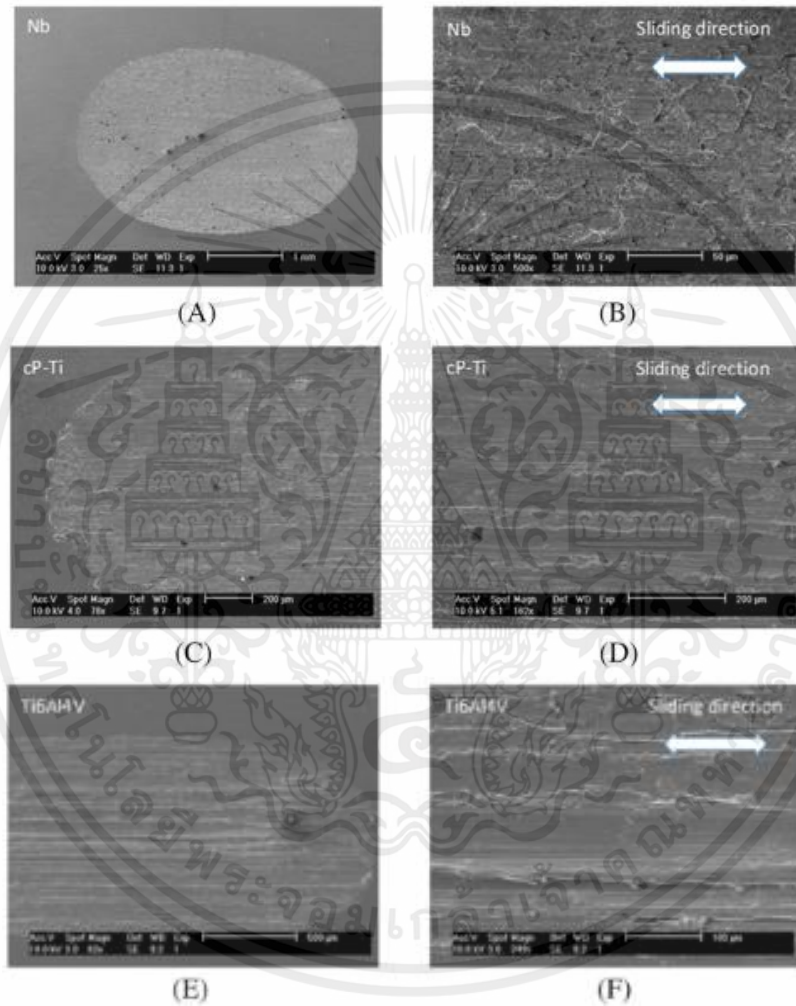


รูปที่ 2.3 กราฟทดสอบความแข็ง [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.2 สมบัติความต้านทานการสึกหรอ (Wear Resistance)

จากงานวิจัยของ Luis Vilhena และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาความต้านทานการสึกหรอของวัสดุทางการแพทย์โดยได้ใช้โลหะไทเทเนียม (cP-Ti) โลหะผสมไทเทเนียม (Ti-6Al-4V) และไนโอเบียมบริสุทธิ์ (Nb) ทำการทดสอบกับบอลเซอร์โครเนีย พบว่าโลหะผสมไทเทเนียมมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายความเสียดทานน้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่ามีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอดี เมื่อเทียบกับโลหะไทเทเนียม (cP-Ti) และไนโอเบียมบริสุทธิ์ (Nb) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เป็นผลมาจากโลหะผสมไทเทเนียมมีความแข็งมากที่สุด

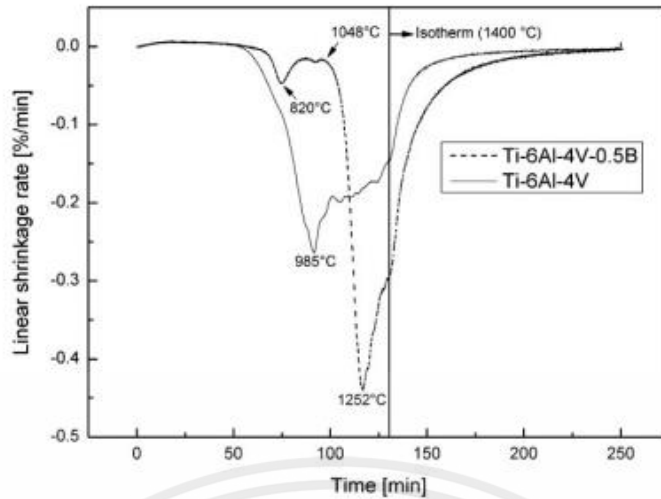


รูปที่ 2.4 แสดงรอยความเสียหายหลังการทดสอบการสึกหรอ

2.1.3.3 สมบัติการต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance)

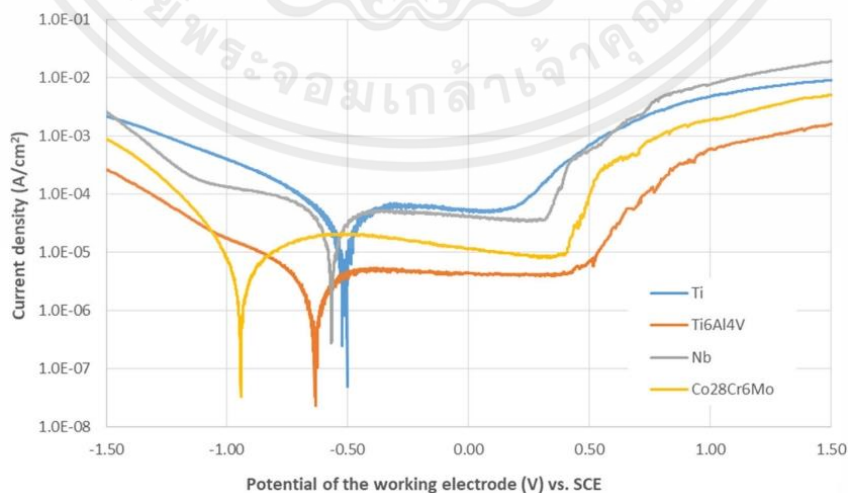
จากงานวิจัยของ Thomas Ebel และคณะ [22] ได้ทดสอบการต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทดสอบในสารละลาย Ringer ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าการเติมโบรอนลงในโลหะผสมไทเทเนียมมีการกัดกร่อนที่ต่ำและสม่ำเสมอของพื้นผิวเนื่องจากโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมโบรอนมีการเปลี่ยนแปลง (ขนาดเกรนลดลง เกิดการก่อตัวของไทเทเนียมไฮดรอกไซด์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 กราฟทดสอบการกัดกร่อน [22]

จากงานวิจัยของ Luos Vilhena และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาการต้านทานการกัดกร่อนของวัสดุทางการแพทย์โดยได้ใช้โลหะไทเทเนียม (cP-Ti) โลหะผสมไทเทเนียม (Ti-6Al-4V) ไนโอเนียมบริสุทธิ์ (Nb) และโลหะผสมโคบอลต์โครเมียม (Co28Cr6Mo) ด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า (Electrochemical techniques) ทดสอบในสารละลายน้ำลายเทียม ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.6 จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมเกิดการกัดกร่อนเร็วสุดเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น ๆ และโลหะไทเทเนียมเกิดการกัดกร่อนช้าสุด และจะเห็นว่าช่วงกราฟบริเวณ 1.0×10^{-6} ถึง 1.0×10^{-4} A/cm² เส้นกราฟจะมีลักษณะแบบคงที่ซึ่งบ่งชี้ถึงความเสถียรสูงของฟิล์มออกไซด์ที่เกิดการก่อตัวขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดการต้านทานการกัดกร่อนดี เมื่อพิจารณา I_{corr} กับ E_{corr} ดังแสดงในรูปที่ 2.7 จะเห็นว่าโลหะผสมไทเทเนียมมีค่า I_{corr} น้อยซึ่งสอดคล้องกับอัตราการกัดกร่อนต่ำ และมี E_{corr} สูงสอดคล้องกับปฏิกิริยาการกัดกร่อนช้าเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น ๆ ดังนั้นโลหะผสมไทเทเนียมมีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีที่สุด



รูปที่ 2.6 เส้นโค้งโพลาริเซชันของโลหะไทเทเนียม [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Specimens	i_{corr} , $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	E_{corr} , mV vs SCE	Corrosion Rate, mm/y
Co28Cr6Mo	4.45	-939	0.06
Nb	3.15	-564	0.02
cP-Ti	29.84	-558	0.35
Ti6Al4V	2.41	-652	0.02

รูปที่ 2.7 ผลวิเคราะห์จากกราฟ Polarization ของโลหะไทเทเนียม

2.2 การขึ้นรูปโลหะด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป

กระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะ หรือ Metal Injection Molding (MIM) เป็นกระบวนการขึ้นรูปหนึ่งที่มีการตัดแปลงและพัฒนาจากการฉีดขึ้นรูปเม็ดพลาสติกแต่จะใช้โลหะผงในการขึ้นรูป ซึ่งเหมาะกับการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและมีรูปร่างที่ซับซ้อน และต้องการผลิตชิ้นงานในปริมาณมาก แต่อย่างไรก็ตามก็มีข้อเสียในด้านของการสึกหรอของแม่พิมพ์และอุปกรณ์การขึ้นรูปเนื่องจากการขึ้นรูปโลหะนั้นมีความแข็งสูงและจะต้องใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปปริมาณมากทำให้อุปกรณ์ชำรุดได้ง่าย

2.2.1 กระบวนการฉีดขึ้นรูป

การฉีดขึ้นรูปจะเริ่มต้นโดยการเทผงโลหะลงในฮอปเปอร์อันเป็นจุดป้อนวัสดุ จากนั้นผงโลหะจะถูกทำให้ร้อนและละลายภายในกระบอกลูกสูบเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการฉีด จากนั้นวัสดุจะถูกดันผ่านหัวฉีดของชุดฉีดก่อนที่จะถูกส่งผ่านช่องในแม่พิมพ์ที่เรียกว่า สกรู จากนั้นก็จะไหลผ่านท่อทางไหลแต่ละท่อเข้าไปในช่องแม่พิมพ์ หลังจากวัสดุเย็นและแข็งตัวแล้ว แม่พิมพ์จะเปิดออกและดันขึ้นส่วนที่หล่อออกมา จากนั้นสกรูและท่อทางไหลจะถูกตัดออกจากชิ้นส่วนเพื่อให้กระบวนการขึ้นรูปชิ้นส่วนเสร็จสิ้น เนื่องจากภายในแม่พิมพ์จะมีช่องว่างมากกว่าหนึ่งช่องสำหรับการผลิตชิ้นส่วนที่มากกว่าหนึ่งชิ้นในแต่ละครั้ง การฉีดวัสดุที่ละลายแล้วลงไปแม่พิมพ์ให้เท่ากันจึงเป็นเรื่องสำคัญ ด้วยเหตุนี้รูปทรงของแม่พิมพ์จึงควรออกแบบมาเพื่อการนี้ ขั้นตอนการกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะมีดังนี้

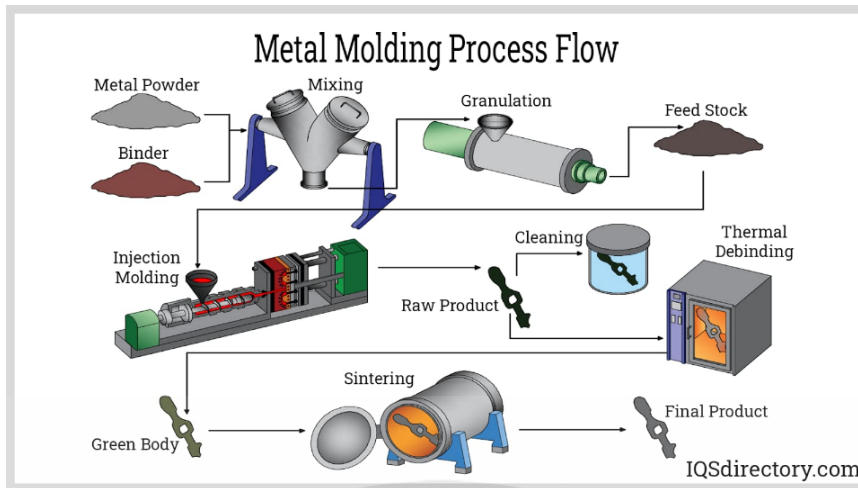
2.2.1.1 การผสมโลหะ สามารถทำได้ในภาวะผสม เช่น หม้ออบตเพื่อให้ผงโลหะเพื่อให้ผงวัสดุเข้ากันได้ดี

2.2.1.2 การผสมสารยึดเพื่อเตรียมส่วนผสมเม็ด (Feedstock Preparation) เติมสารเพื่อให้ผงวัสดุยึดติดกันได้ด้วยดีส่งผลให้ความสามารถในการอัดตัวของผงสูงและช่วยให้เกิดการไหลที่ดี

2.2.2.3 การฉีดขึ้นรูป การให้ความร้อนแก่ผงโลหะจากนั้นสกรูจะดันโลหะเหลวเข้าไปยังแม่พิมพ์โดยจะต้องควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมและระยะเวลาในการเย็นตัวของชิ้นงานเพื่อให้ของเหลวเกิดเป็นของแข็ง

2.2.1.4 การกำจัดสารยึด การใช้สารละลายเพื่อกำจัดตัวยึดก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการเผาผนึก

2.2.1.5 การเผาผนึก การให้ความร้อนเพื่อกำจัดสารยึดเพื่อให้ได้ชิ้นงานจริงก่อนที่จะนำไปใช้งาน จำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิ ความดัน และอัตราการให้ความร้อนในการเผาผนึก



รูปที่ 2.8 แผนภาพกระบวนการขึ้นรูป Metal Injection Molding (MIM)

2.2.2 เครื่องฉีดขึ้นรูปวัสดุผง (Powder Injection Molding Machine)

เครื่องขึ้นรูปผงโลหะถูกพัฒนามาจากเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติกประกอบด้วย 2 ส่วนคือ

1. เครื่องมือฉีดและแม่พิมพ์

องค์ประกอบเครื่องมือฉีด เป็นส่วนที่ประกอบด้วยชุดขับเคลื่อนสกรูและกระบอกฉีดให้เคลื่อนที่อันประกอบไปด้วย

1. กรวยเติม (Hopper) ซึ่งใช้บรรจุส่วนผสมเม็ดป้อนเข้าสู่กระบอกฉีด โดยติดตั้งอยู่ตรงส่วนต้นของกระบอกฉีด
2. กระบอกฉีด (Barrel) ให้อุณหภูมิกัดขึ้นรูป ทำให้ส่วนผสมเม็ดหลอมตัว และสร้างแรงดันขับไปด้านหน้าด้วยสกรูที่บรรจุอยู่ในกระบอกฉีดและขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ส่วนปลายของกระบอกฉีดจะต่อเข้ากับหัวฉีด
3. สกรู (Screw) เป็นตัวขับเคลื่อนส่วนผสมเม็ดหลอมเหลวเข้าสู่ขั้นตอนการฉีดขึ้นรูปผง โดยสกรูแบ่งออกเป็น 3 ตอน คือ Feeding Zone, Transition Zone และ Metering Zone เกลียวสกรู จะก่อให้เกิดอัตราแรงอัด ที่เหมาะสมทำให้ส่วนผสมเม็ดหลอมเหลวถูกอัดป้อนไปด้านหน้าสู่ปลายกระบอกฉีด สามารถเคลื่อนที่ถอยหลังและดันกลับในช่วงจังหวะการฉีดขึ้นรูปผงโลหะ ส่วนปลายสกรู อยู่ในตำแหน่งที่ประกบเข้ากับหัวฉีด
4. หัวฉีด (Nozzle) เป็นส่วนต่อปลายกระบอกฉีดเข้ากับช่องทางไหลเข้าสู่ในแม่พิมพ์หัวฉีดมีรูขนาดเล็ก เพื่อให้ส่วนผสมเม็ดหลอมเหลวไหลผ่านเข้าสู่โพรงแบบด้วยความรวดเร็ว

2. องค์ประกอบชุดแม่พิมพ์

1. แม่พิมพ์ (Mold) ถูกออกแบบให้มีช่องว่างด้านในตามรูปร่างตามผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิตแต่มีขนาดใหญ่กว่าเนื่องจากต้องเผื่อการหดตัวจากการฉีดขึ้นรูปและการเผาผนึก แม่พิมพ์มี 2 ชั้น ประกบกันที่รอยต่อ (Parting Line) เพื่อให้สะดวกต่อการถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ นอกจากนี้มีองค์ประกอบด้านในคือทางเข้าแม่พิมพ์เรียกว่าสปรู (Sprue) ทางวิ่ง (Runner) ทางเข้า (Gate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ชุดอุปกรณ์หนีบยึดแม่พิมพ์ (Clamping unit) มีกลไกขับเคลื่อนด้วยระบบไฮดรอลิกเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของ Moving Platen สำหรับเปิดและปิดฝาแม่พิมพ์



รูปที่ 2.9 เครื่อง Metal Injection Molding (MIM)

2.3 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.3.1 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง หรือ Optical Microscope (OM)

2.3.1.1 หลักการทำงาน

กล้องที่มีแหล่งกำเนิดแสง โดยแสงเป็นตัวช่วยทำให้มองเห็นภาพแสงวิ่งผ่านเลนส์ไปกระทบวัตถุแสงที่กระทบจะสะท้อนกลับเข้าสู่เลนส์ใกล้ตาทำให้เกิดภาพกำลังขยายสูงบนวัตถุที่นำมาส่อง [2]



รูปที่ 2.10 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

2.3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องกราด หรือ Scanning Electron Microscope (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

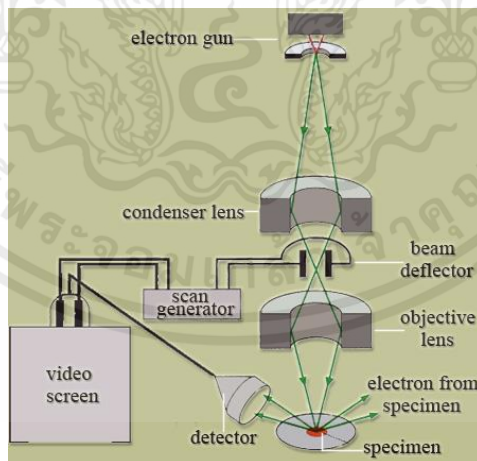
เป็นต้น อีกทั้งมีความสามารถในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวชิ้นงานโลหะเช่น การกระจายตัวของเฟส ส่วนผสมทางเคมี การจัดเรียงโครงสร้างผลึก ขอบเกรนและอื่นๆ [3]



รูปที่ 2.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

2.3.2.1 หลักการทำงานของเครื่อง หรือ Scanning Electron Microscope (SEM)

ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวมรังสี (Condenser Lens) เพื่อให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้ [3]



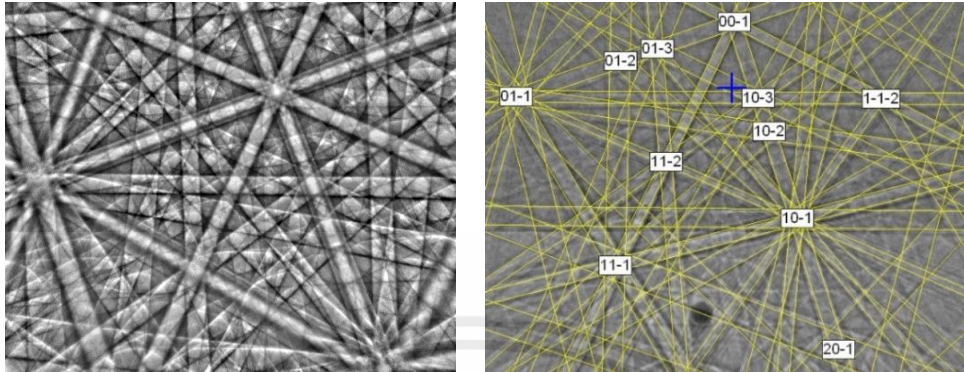
รูปที่ 2.12 หลักการทำงานของ Scanning Electron Microscope (SEM)

2.3.2.2 เทคนิคการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนแบบกระจายกลับ

เทคนิคการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนแบบกระจายกลับ หรือ Electron Back Scattered Diffraction (EBSD) เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาทิศทางการวางตัวของผลึกโดยมีหลักการคือ การใช้ลำแสงอิเล็กตรอนที่ยิงมาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดจะถูกเลี้ยวเบนโดยระนาบของผลึกซึ่งไปตกกระทบบนจอฟอสเฟอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดเป็นแถบลดตายชั้น โดยแถบลดตายนี้เรียกว่า แถบคิกูชิ ซึ่งจะบอกถึงลักษณะโครงสร้างผลึกและทิศทางการวางตัวของผลึก ซึ่งจะมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณเพื่อบอกทิศทางการวางตัวของแต่ละระนาบผลึก [4]

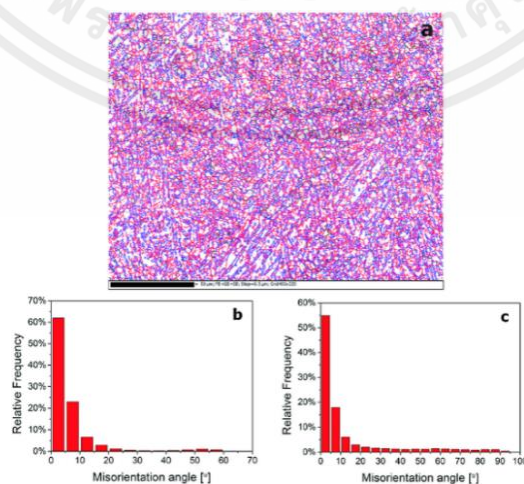


รูปที่ 2.13 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนแบบกระจายกลับ การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทำ Electron Back-Scattered Diffraction (EBSD)

การทำชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EBSD จะต้องทำตามวิธีการเตรียมชิ้นงานสำหรับการศึกษาโครงสร้างโลหะเริ่มจาก 1) การเตรียมชิ้นงานโลหะตัดชิ้นงานที่ต้องการศึกษา 2) การขัดกระดาษความละเอียดจากความละเอียดน้อยไปยังความละเอียดมาก 3) การขัดด้วยผ้าละเอียดขนาด 3 ไมโครเมตรขึ้นไปจากนั้นขัดด้วยผ้าสักหลาดพร้อมน้ำยา OPS

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EBSD

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์คือ แถบคิกูชิ ซึ่งจะมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณเพื่อบอกทิศทางการวางตัวของแต่ละระนาบผลึกของวัสดุนั้น ๆ หากต้องการศึกษาขอบเกรน (Grain Boundary) จะมีฟังก์ชันการประมาณนอกช่วง (Extrapolation) สามารถบอกทิศทางการวางตัวของผลึกหากต้องการให้เห็นว่ามี การแบ่งขอบเกรนที่ชัดเจนจะต้องกำหนดค่ามุมความแตกต่างทางผลึก เพื่อกำหนดหนดเงื่อนไขถ้ามุมเกินจะถือว่าเป็นคนละเกรน [4]



รูปที่ 2.14 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EBSD

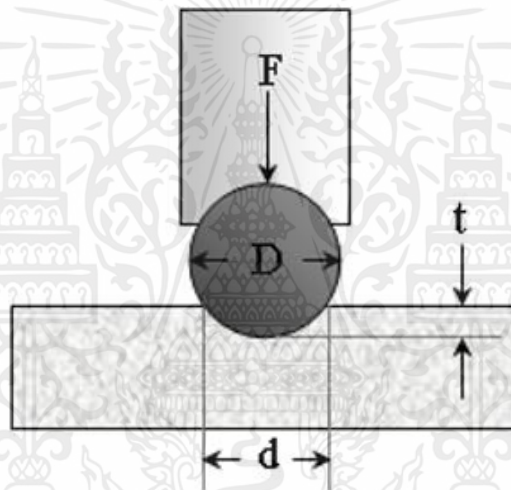
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การทดสอบความแข็ง (Hardness)

ความแข็งหมายถึง ความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ จากแรงกระทำโดยวัสดุอื่น เช่นการกดความแข็งลงบนวัสดุ การการระแทก หรือการขีดส่วนขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการทดสอบ โดยมากแล้วมักจะนิยมนำมาใช้ทดสอบวัสดุประเภทโลหะ ค่าความแข็งของวัสดุเป็นค่าที่สามารถบอกคุณสมบัติโดยรวมของวัสดุได้ ปัจจุบันมีวิธีการทดสอบที่ได้รับความนิยมอยู่ 3 รูปแบบดังนี้ [5]

2.4.1 การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test)

การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ อาศัยการกดของหัวกดทรงกลมที่ผลิตจากเหล็กกล้าชุบแข็งหรือทังสเตนคาร์ไบด์ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D ลงบนพื้นผิวชิ้นงานทดสอบด้วยแรงกด F ดังรูป โดยคงค่าแรงกดเป็นระยะเวลา 10 ถึง 15 วินาที ทำให้เกิดรอยกดที่มีความลึก t และมีเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดเฉลี่ย d ซึ่งได้จากการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดในแนวตั้งฉาก ลูกบอลที่ใช้เป็นหัวกดมีขนาด 10 มิลลิเมตร และสามารถใช้แรงกดได้ตั้งแต่ 500 กิโลกรัม สูงสุดถึง 3,000 กิโลกรัม [6]



รูปที่ 2.15 การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์

$$B_{hn} = \frac{0.102F}{0.5\pi D \left[D - \sqrt{D^2 - d^2} \right]}$$

เมื่อ F = แรงที่ใช้กด

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัววงกลม ในหน่วยมิลลิเมตร

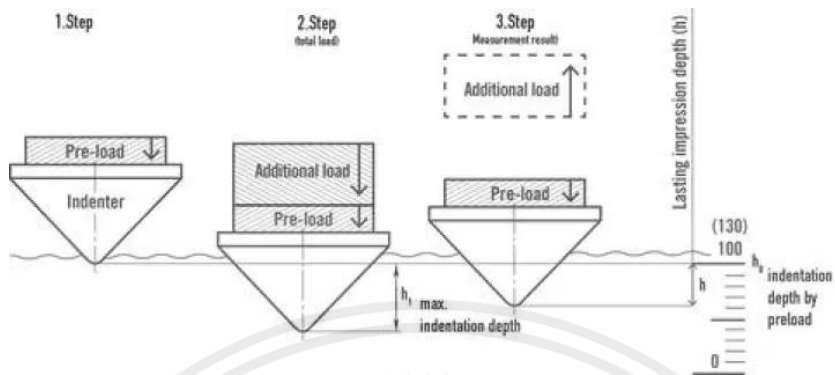
d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดบนผิวชิ้นงานทดสอบ ในหน่วยมิลลิเมตร

t = ขนาดระยะลึกรอยกดจากผิวหน้าลงไป ในหน่วยมิลลิเมตร

2.4.2 การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell Hardness Test)

การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์เป็นการทดสอบความแข็งที่หาค่าความแข็งจากขนาดความลึกรอยกดบนชิ้นงานทดสอบที่เกิดจากการกดด้วยน้ำหนักคงที่ โดยทดสอบด้วยน้ำหนักต่างกันสามชุดและหัวกดสามขนาดซึ่งจะมีรอยกดที่มีขนาดเล็กและตี้นค่าที่ได้จากการทดสอบนั้นสามารถอ่านได้ทันทีจากหน้าปัดเครื่อง ไม่จำเป็นต้องคำนวณเหมือนการทดสอบอื่น ๆ ชิ้นงานที่ถูกกดจะคืนตัวกลับในปริมาณหนึ่ง และคงเหลือเพียงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

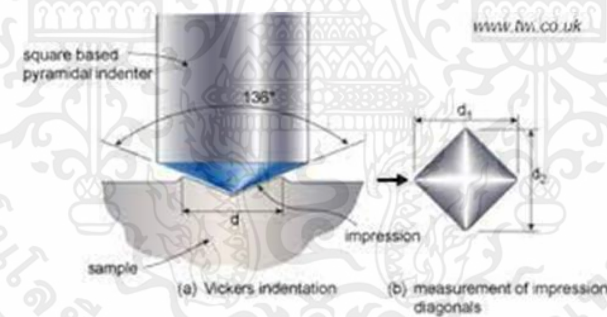
แรงกดนำ ซึ่งปลายหัวกดจะอยู่ ณ ตำแหน่งที่เกิดจากการยุบตัวอย่างถาวรของชิ้นงานทดสอบ หัวกดเป็นลูกบอลเหล็กกล้าแข็งหรือหัวกดเพชรรูปกรวย 120 องศา วิธีการทดสอบที่นิยมใช้ทดสอบกับโลหะมี 3 วิธี คือ ร็อกเวลล์ซี (Rockwell – C) , ร็อกเวลล์บี (Rockwell – B) และร็อกเวลล์เอ (Rockwell – A) [6]



รูปที่ 2.16 การทดสอบความแข็งแบบ Rockwell Hardness Test

2.4.3 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)

การวัดค่าความแข็งที่คำนวณจากน้ำหนักกดที่กระทำต่อพื้นที่ของรอยกด โดยใช้หัวเพชรรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งมีมุมมองของปลายแหลม 136 องศา ชิ้นงานทดสอบด้วยแรงกด F มีขนาดตั้งแต่ 1-120 kg โดยกดตั้งฉากกับชิ้นงานการเคลื่อนที่ของหัวกดลงบนชิ้นงานใช้เวลา 15 วินาที เมื่อหัวกดถูกยกขึ้น รอยกดที่เกิดขึ้นถูกวัดขนาดโดยการวัดเส้นทแยงมุม d1 และ d2 [6]



รูปที่ 2.17 การทดสอบความแข็งแบบ Vickers Hardness Test

$$HV = \frac{2P \sin(136^\circ/2)}{d^2} = \frac{1.8544P}{d^2} \quad : \text{หน่วย kg/mm}^2$$

เมื่อ P = น้ำหนักที่ใช้กดในหน่วยกิโลกรัม

d = ขนาดเส้นทแยงมุมของรอยกดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ในหน่วยมิลลิเมตร

2.5 การทดสอบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน หรือ X-ray diffraction (XRD)

เป็นเครื่องมือที่อาศัยหลักการของ Bragg's Law คือ เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบกับระนาบของอะตอมภายในผลึก รังสีเอกซ์จะเกิดการสะท้อนที่มุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ ทำให้มีการนำมาใช้ศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง ซึ่งผลึกของสารตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้เอกซเรย์นี้เป็นเอกซเรย์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

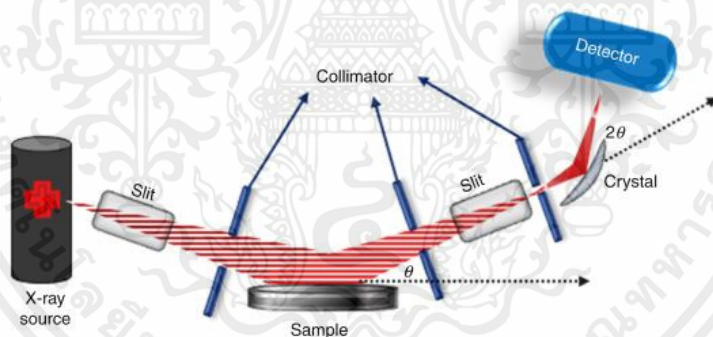
รูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ได้ออกมาแตกต่างกัน ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่าง ๆ กับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ได้ ทำให้สามารถพิสูจน์เอกลักษณ์ (Identification) โครงสร้างผลึกของวัสดุ [13]



รูปที่ 2.18 เครื่องทดสอบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

2.5.1 หลักการทำงานของเครื่อง X-ray diffraction (XRD)

หลักการทำงาน ใช้หลักการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เมื่อผ่านชั้นต่าง ๆ ของอะตอมหรือโมเลกุลภายในวัสดุหรือสารตัวอย่างนั้น แล้วทำการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุมต่าง ๆ ข้อมูลที่ตรวจวัดได้เมื่อผ่านการแปรผลแล้ว ทำให้สามารถพิสูจน์เอกลักษณ์ (Identification) โครงสร้างผลึกของวัสดุหรือสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้ [14]



รูปที่ 2.19 หลักการทำงานของ X-ray Diffraction (XRD)

2.6 การทดสอบสมบัติการต้านทานการกัดกร่อน

การกัดกร่อนของวัสดุ คือสภาวะของวัสดุที่ปฏิกิริยาทางเคมีหรือสภาพแวดล้อมอันส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุอันมีผลให้ประสิทธิภาพการทำงานเสื่อมลงสาเหตุการกัดกร่อนเกิดได้หลายปัจจัย เช่น การกัดกร่อนของแท่งขุดน้ำมันเนื่องจากน้ำทะเลมีองค์ประกอบของเกลืออยู่ทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ตลอดเวลา จำเป็นต้องเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมกับรูปแบบงานที่จะทำตัวอย่างความเสียหายที่เกิดขึ้น จากข้อมูลที่ได้มีการสำรวจในประเทศที่กำลังพัฒนาบางประเทศ พบว่า มีการสูญเสียงบประมาณที่เกิดจากการกัดกร่อนประมาณ 3-5% GNP และในประเทศที่พัฒนาแล้ว เช่น สหรัฐอเมริกา ได้มีการสำรวจมูลค่าการเสียหายเนื่องจากการกัด

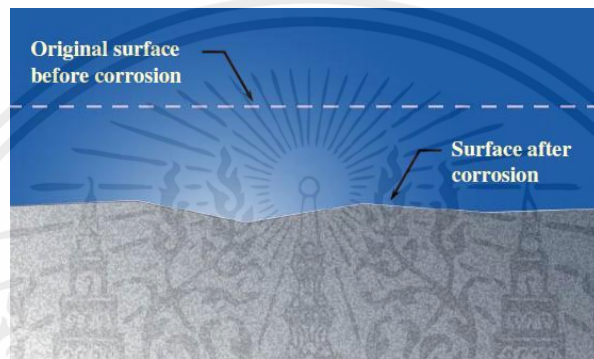
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กร่อน ในปี ค.ศ. 2002 พบว่ามีการสูญเสียงบประมาณที่เกิดจากการกัดกร่อนประมาณ 3.1 % GNP คิดเป็นเงิน 276 พันล้านเหรียญสหรัฐ หรือคิดเป็นเงินไทยประมาณ 11 ล้านล้านบาท [15]

2.6.1 ประเภทของการกัดกร่อน มี 8 ประเภทดังต่อไปนี้

2.6.1.1 การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform Corrosion)

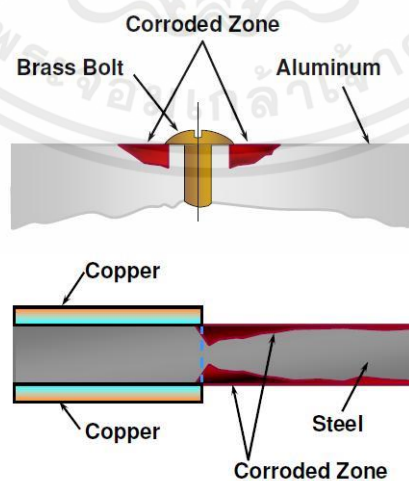
การกัดกร่อนประเภทแบบสม่ำเสมอสามารถพบเห็นได้ทั่วไป โลหะจะถูกกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอโดยปกติแล้วจะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า การกัดกร่อนประเภทนี้เกิดขึ้นเป็นบริเวณกว้างอย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้โลหะบางลงอย่างต่อเนื่องซึ่งไม่ก่อให้เกิดอันตรายมากนักเนื่องจากสามารถคำนวณระยะเวลาการใช้งาน และเปลี่ยนวัสดุเมื่อถึงเวลาอันสมควร [16]



รูปที่ 2.20 การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ

2.6.1.2 การกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ (Galvanic Corrosion)

โลหะแต่ละชนิดจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าเฉพาะตัวหากมีโลหะ 2 ชนิดสัมผัสกันและมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อกันครบองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าเคมี โลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าจะเกิดการกัดกร่อน (ขั้วอโนด) และโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าจะไม่กัดกร่อน (ขั้วคาโทด) หากโลหะมีความต่างศักย์กันมากจะเกิดการกัดกร่อนที่รุนแรงมากขึ้นตามความต่างศักย์ของโลหะทั้ง 2 ชนิด



รูปที่ 2.21 การกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์

วิธีการป้องกันการกัดกร่อนแบบ Galvanic

2.6.1.3 การกัดกร่อนแบบช่องแคบ (Crevice Corrosion)

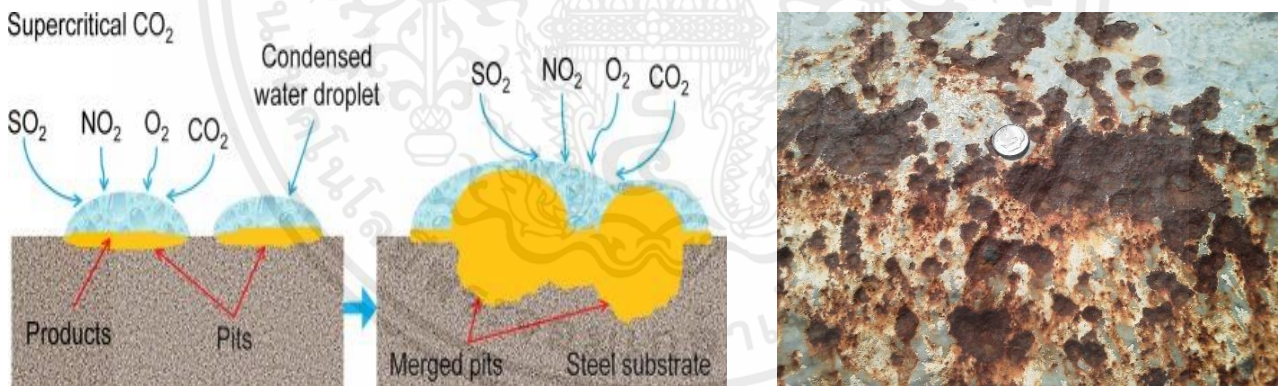
การกัดกร่อนประเภทนี้เกิดขึ้นบนพื้นที่แคบบนผิวโลหะที่สัมผัสโดยตรงกับสารกัดกร่อน อัตราการกัดกร่อนขึ้นอยู่กับปริมาณสารละลายที่ตกค้างอยู่ในหลุมของชิ้นงานหรือช่องแคบที่มีสารละลายเข้าไปขังอยู่เป็นเวลานาน และไม่มีการถ่ายเททำให้เกิดความเข้มข้นของออกซิเจนภายในและภายนอกไม่เท่ากันส่งผลให้เกิดการกัดกร่อน



รูปที่ 2.22 การกัดกร่อนแบบช่องแคบ

2.6.1.4 การกัดกร่อนแบบเป็นหลุม (Pitting Corrosion)

เกิดการกัดกร่อนลึกเข้าไป ส่วนมากเกิดจากวัสดุอยู่สัมผัสสารละลายพวกคลอไรด์ เช่น น้ำทะเล เมื่อวัสดุถูกกัดกร่อน บริเวณกัดกร่อนจะเป็นรูหรือหลุม อาจถูกดบังด้วยตัวกัดกร่อนเอง มักเกิดแบบเฉียบพลัน ตรวจพบได้ยาก มีขนาดเล็ก โดยการกัดกร่อนแบบหลุมนั้นก่อให้เกิดความเสียหายและรุนแรงที่สุด

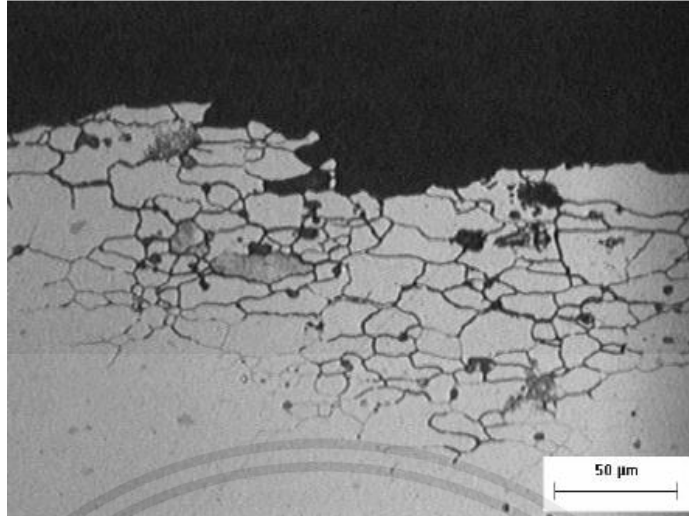


รูปที่ 2.23 การกัดกร่อนแบบเป็นหลุม

2.6.1.5 การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion)

การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนจะเกิดได้ดีกว่าที่พื้นโลหะเล็กน้อย การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนจะเกิดขึ้นรวดเร็วตัวอย่าง เกิดกับเหล็กกล้าไร้สนิม ในบริเวณที่มีการเชื่อมต่อ โดยเหล็กจะสูญเสียโครเมียมในรูปคาร์ไบด์เมื่อเกิดการสูญเสียจะขาดโครเมียมในการสร้างการป้องกันเนื้อเหล็ก โดยขอบเกรนจะแสดงตัวเป็นข้อแอนโนด (สูญเสียเนื้อโลหะ) ภายในเกรนจะแสดงตัวเป็นขั้วแคโทดหากบริเวณขอบเกรนมีอนุภาคอื่น ๆ มาตกตะกอนอยู่ขอบเกรนอาจจะถูกกัดกร่อน เมื่อการกัดกร่อนเกิดขึ้นได้ระยะเวลาหนึ่งบริเวณพื้นที่ที่แสดงตัวเป็นแอโนดจะเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงไป

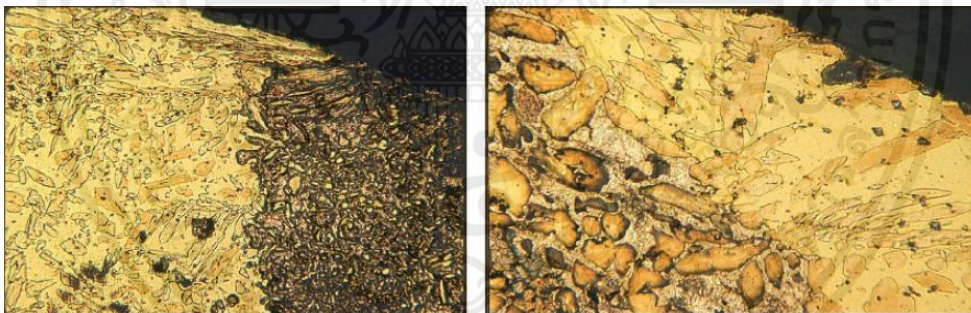
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 การกัดกร่อนตามขอบเกรน

2.6.1.6 การผุกร่อนแบบเลือก (Selective Leaching or Dealloying)

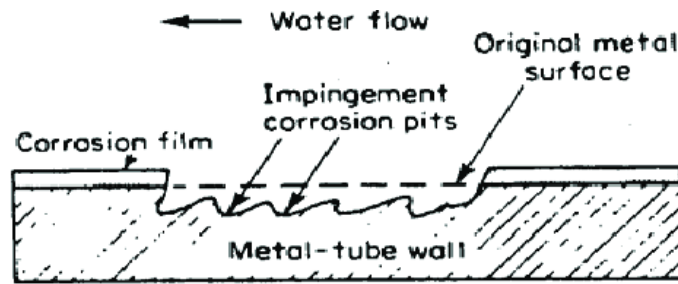
เกิดวัตถุที่เป็นอโลหะนิยมผสมที่ธาตุโลหะหนึ่งเสถียรกว่าธาตุหนึ่งเมื่อสัมผัสสภาพแวดล้อม เช่น การกัดกร่อนของทองเหลือง (Dezincification) โดยทองเหลืองจะสูญเสียสังกะสี เหลือแต่ทองแดงทำให้เป็นรูพรุน รูปทรงของวัตถุจะไม่เปลี่ยนแปลงแต่ความแข็งแรงจะลดลง สามารถลดการกัดกร่อนได้โดยเติมดีบุกลงไปประมาณร้อยละ 1 ในทองเหลือง



รูปที่ 2.25 การผุกร่อนแบบเลือก

2.6.1.7 การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ (Erosion Corrosion)

เกิดจากปฏิกิริยาเคมีและการเคลื่อนที่ เช่น การไหลหรือเคลื่อนที่ของสารละลายหรือของเหลวที่มีผลต่อการกัดกร่อน ไหลผ่านโลหะและมักไหลด้วยความเร็วสูง หากของไหลนี้มีฤทธิ์กัดกร่อนสูง เมื่อโลหะเริ่มสึกทำให้โลหะเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายขึ้นหากโลหะนั้นมีฟิล์มปกคลุมผิวได้ การไหลของของไหลอาจทำให้ฟิล์มถูกทำลายไปบางส่วน ถ้าฟิล์มนี้สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้อย่างง่ายและรวดเร็ว การกัดกร่อนก็จะไม่รุนแรงนัก แต่หากฟิล์มใหม่เกิดขึ้นได้ช้าก็จะทำให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นรุนแรงและรวดเร็ว



รูปที่ 2.26 การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ

2.6.1.8 การกัดกร่อนโดยความเค้น (Stress Corrosion)

เกิดจากความเค้นหรือแรงเค้นของสภาพแวดล้อม เช่น การตัด, การดัด, ความร้อนภายนอก, การสั่นสะเทือน หรือความเค้นจากภายในของวัตถุที่อาจหลงเหลือจากการขึ้นรูป การเย็นตัวที่ไม่สม่ำเสมอ ความเค้นอาจเป็นความเค้นตักค้างหรือความเค้นภายนอกที่มากระทำ การเสียหายแบบนี้ผิวโลหะอาจไม่ถูกกัดกร่อนหรือไม่เปลี่ยนแปลงแต่ในเนื้อโลหะจะมีรอยร้าวอยู่มาก



รูปที่ 2.27 Stress Corrosion

2.7 การทดสอบสมบัติการสึกกร่อน

DIN 50320 หรือ มาตรฐานกลไกการสึกกร่อนได้นิยามเอาไว้ “การสูญเสียเนื้อวัสดุอย่างต่อเนื่องจากบริเวณผิวของของแข็งเนื่องมาจากผิวของวัสดุได้รับแรงทางกล” โดยสาเหตุการสึกกร่อนมีหลายประการและมักจะเกิดจากหลาย ๆ สาเหตุพร้อมกันโดย [17]

2.7.1 ประเภทของการสึกกร่อน สามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทดังนี้

2.7.1.1 การสึกกร่อนแบบยึดติด

สาเหตุการสึกกร่อนประเภทนี้เกิดจากความไม่เรียบของผิวชิ้นงานในระดับจุลภาคทำให้เนื้อของวัสดุที่เชื่อมติดติดเข้าด้วยกันและขาดออกจากกันเรียกว่า “การเชื่อมเย็น” ซึ่งเกิดในระดับโมเลกุลการสึกกร่อนแบบยึดติดมักจะเกิดขึ้นเมื่อมีการลื่นไถลแบบไร้สารหล่อลื่น และมักจะมีเศษโลหะเกิดขึ้นระหว่างผิวหน้าสัมผัสมีผลทำให้ผิวของวัสดุเกิดการชำรุดเสียหายได้

2.7.1.2 การสึกหรอแบบขัดถู

การสึกหรอที่เกิดจากเนื้อวัสดุหลุดหายไปจากการถูกขีดข่วนหรือถูกขูดเป็นร่องหรือเกิดจากการที่มีผงฝุ่นสิ่งสกปรกที่มีความแข็งมาก ๆ แทรกอยู่ระหว่างผิวคู่สัมผัสและทำให้เกิดร่องลึกหรือรอยขีดการสึกหรอแบบนี้เกิดขึ้นจากปัจจัยต่าง ๆ อาทิเช่นชนิดของอนุภาคสิ่งขนาดของอนุภาคปริมาณของสิ่งสกปรกชนิดของวัสดุคู่สัมผัสและปัจจัยการใช้งานอื่น ๆ เช่น ความเร็วการเคลื่อนที่สัมผัสภาระงานชนิดของสารหล่อลื่นและอุณหภูมิ เป็นต้น

2.7.1.3 การสึกหรอแบบล้าตัว

การสึกหรอที่เกิดจากการล้าตัวของเนื้อวัสดุซึ่งทำให้เห็นว่าผิววัสดุมีหลุมมีรอยแตกหรือรอยแยกอันเป็น ผลมาจากการเสียรูปทั้งในลักษณะของการเสียรูปแบบถาวรหรือการคืนรูปเดิมได้เกิดการเกิดการล้าตัวมักเกิดขึ้นกับชิ้นงานหรือชิ้นส่วนที่รับภาระสลับหรือเป็นวงรอบทำให้เกิดตามดหลุมหรือรอยแตกกว้างขึ้นทั้งบนและในผิวชิ้นงาน

2.7.1.4 การสึกหรอแบบปฏิกิริยาไทรโบเคมีคอล

การสึกหรอที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างผิววัสดุคู่สัมผัสกับสารหล่อลื่นภายใต้การเคลื่อนที่ที่มีความเค้นกดชั้นผิวของปฏิกิริยาดังกล่าวมีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีโดยทั่วไปชั้นผิวฟิล์มดังกล่าวจะมีเสถียรภาพน้อยต่อค่าแรงเฉือนแต่หากชั้นผิวฟิล์มดังกล่าวทำให้เกิดการสึกหรอมากขึ้นเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมีซึ่งอาจจะเรียกสิ่งเหล่านี้ว่า “การสึกหรอแบบกัดกร่อน”

2.7.2 เครื่องมือทดสอบการสึกหรอ

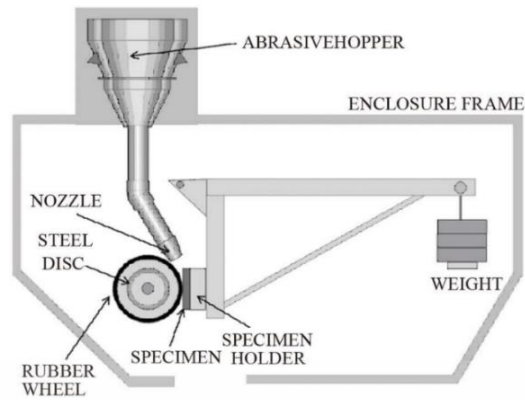
เครื่องมือทดสอบการสึกหรอและความเสียดทานนั้นถูกพัฒนาขึ้นมาจากเครื่องทดสอบแบบพินออน ดิสก์จะเป็นแบบที่นิยมใช้กันมากที่สุด โดยเฉพาะสำหรับการทดสอบวัสดุประเภทเซรามิกและทดสอบผิวเคลือบ นอกจากนี้ก็มีเครื่องทดสอบแบบพินออนเพลทสำหรับศึกษาการสึกหรอในกระบอกสูบและแหวนลูกสูบในเครื่องยนต์ และเครื่องทดสอบแบบบล็อกออนริงสำหรับไว้ทดสอบวัสดุที่ใช้ทำลูกปืนโดยปัจจุบันได้มีเครื่องทดสอบออกมาจำหน่ายหลายประเภทที่มีความเชื่อถือได้

ประเภทของเครื่องมือทดสอบการสึกหรอสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

1. เครื่องมือทดสอบการสึกหรอแบบขัดถู

1. การทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดรัม (Pin-on-Drum) เป็นการทดสอบที่เป็นการสัมผัสระหว่างวัสดุทดสอบพินบนผิวโค้งของดรัมร่องสึกจะเป็นวงคล้ายสปริงตามทิศทางการเคลื่อนที่ของพิน

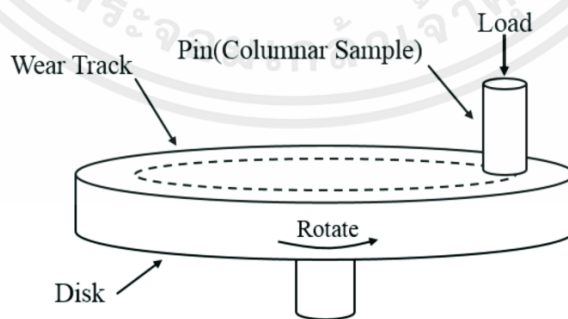
2. การทดสอบการสึกหรอแบบรับเบิลวีว (Rubble Wheel) เป็นการทดสอบอีกแบบหนึ่งที่มีความนิยมในการทดสอบการสึกหรอแบบขัดถูของทั้งชิ้นงาน และผิวเคลือบชิ้นงานทดสอบจะอยู่ในรูปของก้อนสีเหลี่ยม ซึ่งถูกกดเข้ากับล้อยางที่หมุนอยู่ทรายเกรดพิเศษจะถูกเทให้ไหลลงไปอยู่ระหว่างชิ้นงานและล้อยางเมื่อครบเวลาหรือจำนวนที่กำหนดจึงนำชิ้นงานไปชั่งหาน้ำหนักที่หายไปเพื่อหาปริมาณการสึกหรอที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.28 การทดสอบการสึกหรอแบบรับเบิลวิว

3. การทดสอบการสึกหรอแบบเวทเรลอะบราชัน (Wet Rail Abrasion) มีความคล้ายคลึงกับการทดสอบแบบรับเบิลวิวอยู่มาก แต่ชิ้นงานที่กดไว้กับล้อจะถูกจุ่มอยู่ในสารละลายที่มีทรายแขวนลอยไว้ทำให้การทดสอบนี้เหมาะกับงานที่อยู่ในสภาวะการใช้งานจริงซึ่งจะมีของเหลวเข้ามาเกี่ยวข้องของความแข็งของล้อที่ใช้ชิ้นงานจะมีผลต่อค่าการทดลองที่ได้จึงเป็นปัจจัยสำคัญตัวหนึ่งในการทดสอบ

4. การทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิสก์ (Pin-on-Disk) หรือการทดสอบการสึกหรอแบบไถลเป็นการทดสอบแบบหนึ่งที่ใช้ทั้งในห้องปฏิบัติการและการใช้งานทั่วไปโดยจะทำการทดสอบด้วยวัสดุ 2 ชนิดคู่กันวัสดุชิ้นหนึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลมหรือแท่งทรงกระบอก ซึ่งเรียกว่า พินที่ถูกสวมด้วยลูกตุ้มเพื่อเพิ่มแรงกดวางตั้งฉากและให้สัมผัสกับวัสดุอีกชิ้นหนึ่งที่มีลักษณะเป็นจานเรียกว่า ดิสก์ โดยการทดสอบจะให้ดิสก์หมุนในลักษณะวงกลมรอบตัวเองเกิดการเสียดสีระหว่างผิววัสดุทั้งสองจนเกิดเป็นร่องการเสียดสีที่เรียกว่า รอยสึก ชิ้นงานที่นำมาทดสอบสามารถใช้วัสดุได้หลากหลายชนิดหลากหลายประเภทแต่มีข้อกำหนดคือชิ้นงานต้องมีขนาดที่แน่นอนสามารถทนความเค้นที่เกิดขึ้นโดยไม่เกิดการโก่งงอในการทดสอบโดยทั่วไปชิ้นงานที่เป็นพินจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 – 10 มิลลิเมตรชิ้นงานที่เป็นดิสก์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20-100 มิลลิเมตรมีความหนา 2-10 มิลลิเมตรและผิวของชิ้นทดสอบต้องมีความหยาบผิว (Ra) ไม่เกิน 0.8 ไมโครเมตร

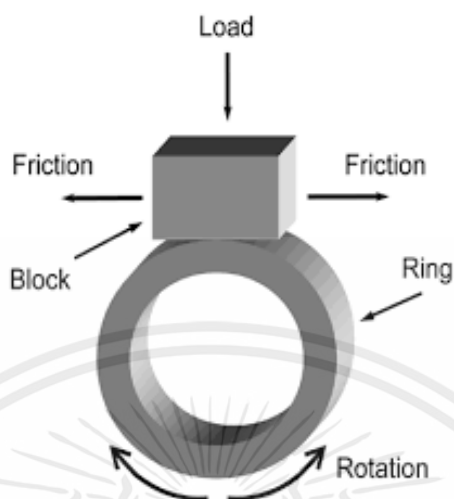


รูปที่ 2.29 การทดสอบการสึกหรอแบบ Pin-on-Disk

2. เครื่องมือทดสอบการสึกหรอแบบโลหะบนโลหะ

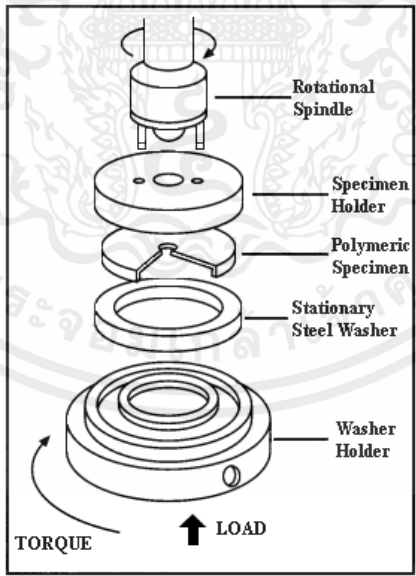
1. การทดสอบการสึกหรอแบบบล็อกออนริง (Block-on-Ring) ชิ้นทดสอบอยู่ในรูปของก้อนสี่เหลี่ยมซึ่งจะถูกกดเข้ากับแหวนทดสอบที่หมุนอยู่ปริมาณการสึกหรอบนชิ้นงานวัดได้จากความกว้างของร่องสึก การเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สึกหรอของแหวนทดสอบวัดได้จากการชั่งน้ำหนักแล้วคำนวณออกมาเป็นปริมาตรที่หายไปสามารถทดสอบวัสดุได้หลากหลายประเภททั้งโลหะเซรามิกและโพลีเมอร์



รูปที่ 2.30 การทดสอบการสึกหรอแบบ Block-on-Ring

2. การทดสอบการสึกหรอแบบ Thrust Washer เป็นการศึกษาอัตราการสึกหรอและค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานของวัสดุหล่อลื่นในตัวเอง เช่นกราไฟต์เทฟลอน เป็นต้นโดยการทดสอบแหวนรองที่ไม่หมุนจะถูกดันขึ้นไปสัมผัสกับชิ้นงานที่หมุนอยู่ เมื่อครบช่วงเวลาที่กำหนดจึงนำชิ้นงานและแหวนรองออกมาวัดความหนาที่หายไปเพื่อคำนวณหาอัตราการสึกหรอ

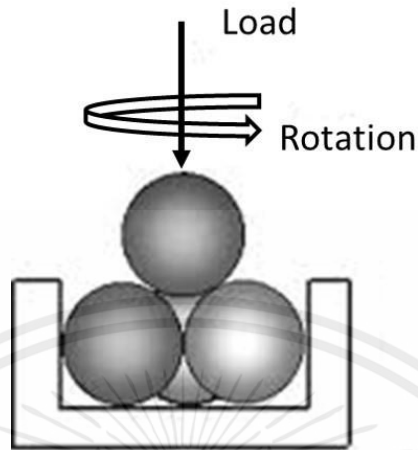


รูปที่ 2.31 การทดสอบการสึกหรอแบบ Thrust Washer Test

3. การทดสอบการสึกหรอแบบโฟร์บอล (Four-Ball) เป็นการศึกษาความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของสารหล่อลื่นลูกบอลทดสอบที่ใช้จึงกำหนดเป็นเหล็กกล้าทั้งหมด โดยการทดสอบนั้นลูกบอลด้านบนที่เคลื่อนไปได้ด้วยสารหล่อลื่นจนตัวจะหมุนรอบตัวเองในขณะที่ถูกกดลงบนลูกบอลอีก 3 ลูกด้านล่าง เมื่อครบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาที่กำหนดจึงถอดลูกบอลออกเพื่อวัดความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยสึกบนลูกบอลที่อยู่กับที่ทั้ง 3 ลูก แล้วนำมาคำนวณหาปริมาณการสึกหรอต่อไป



รูปที่ 2.32 การทดสอบการสึกหรอแบบ Four-ball

2.7.3 การวัดและการวิเคราะห์

แรงเสียดทานระหว่างตัวอย่างและบอล ระหว่างการเคลื่อนที่ไปกลับเชิงเส้นจะวัดโดยโพลดเซลล์ แนวนอน และแสดงถึงแรงที่ต้องใช้ในการเคลื่อนที่ตัวอย่างด้วยความเร็วคงที่ที่กำหนด แรงเสียดทานนี้ F เกี่ยวข้องกับแรงปกติ F_N ที่กระทำโดยบอลและโพลดที่ตั้งไว้ โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน μ ผ่านความสัมพันธ์ในสมการ 1 แรงเสียดทานที่เป็นตัวแทนสำหรับรอบเดียวซึ่งประกอบด้วย การเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของตัวอย่างเลื่อน โดยที่ F จะแสดงเป็นบวก หมายถึงโพลดเซลล์ถูกหักล้างหรือตั้งค่าเป็นศูนย์ก่อนที่การวัด แต่ละชุดจะตั้งค่าเพื่อละทิ้งค่าชดเชยใด ๆ ที่ไม่ได้ให้ข้อมูลที่มีความหมายในการทดสอบนี้ การวิเคราะห์ทั้งหมดจะขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดสูงสุดของโพลด เนื่องจากธรรมชาติของโหมดเคลื่อนที่กลับเชิงเส้น ค่าสูงสุดใน F ที่จุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ของตัวอย่างเลื่อนแต่ละครั้งจะวัดแรงเสียดทานสถิต F หรือแรงที่ต้องใช้ในการเลื่อนตัวอย่างเลื่อนจากจุดหยุดสนิท บริเวณที่ราบสูงทันทีหลังจากจุดยอด F_s มีข้อมูลเกี่ยวกับ F_k ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานจลน์ (หรือพลวัต) ซึ่งอธิบายถึงแรงเสียดทานระหว่างสองพื้นผิวที่เคลื่อนที่

$$\mu = \frac{F}{F_N} \quad (1)$$

สมการ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทาน F แรงปกติ F_N และ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน μ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ใบบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานของการพัฒนาโลหะผสมไทเทเนียมโดยการเติมธาตุโบรอนด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะ ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

3.1 วัสดุ

ชิ้นงานขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดโลหะ (Metal Injection Molding, MIM) และเผาผนึก (Sintering) ที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ชิ้นงานมีเงื่อนไขดังนี้

1. โลหะผสมไทเทเนียม (Ti-6Al-4V)
2. โลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Ti-6Al-4V-0.5B)
3. โลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Ti-6Al-4V-1B)
4. โลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Ti-6Al-4V-1.5B)

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์วัสดุ

1. เครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Tester) : Mitutoyo 810-969A - HM-113 Micro Hardness Tester
2. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM) : Olympus BX53M
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) : JEOL SM-7800F, HITACHI SU8230
4. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) : SmartLab SE
5. เครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat) : Autolab PG302N
6. เครื่องทดสอบไทรโบมิเตอร์ (Tribometer) : MFT-5000 TRIBOMETER

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการเตรียมชิ้นงาน

1. เครื่องตัดเหล็ก (Cutting Machine)
2. เครื่องขึ้นเรือนแบบร้อน (Hot Mounting)
3. ผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon Black)
4. เครื่องขัดชิ้นงาน (Grinding and Polishing Machine)
5. กระดาษทราย (Sandpaper) เบอร์ 180 240 320 400 600 800 1000 1200 และ 2000
6. แผ่นขัด (Polishing Disc) ความละเอียด 3 ไมโครเมตร และแผ่น OPS
7. สารหล่อลื่น (Lubricant)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ผงขัดเพชรขนาด 3 ไมครอน
9. ผงขัดออกไซด์ (Oxide Polishing; OPS)

3.3 การเตรียมชิ้นงาน

1. ใช้เครื่องตัด ตัดชิ้นงานให้เป็นชิ้นเล็กจำนวนเงื่อนไข 2 ชิ้น และนำมาขึ้นเรือนแบบร้อน
2. เตรียมผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายกระดาษทรายเบอร์ 100 180 240 320 400 600 800 1,000 1,200 และ 2,000 ตามลำดับ (เมื่อเปลี่ยนกระดาษทรายต้องวางชิ้นงานให้ตัดกับรอยเดิม)
3. ขัดละเอียดด้วยแผ่นขัด 3 ไมโครเมตร และแผ่น OPS
4. ล้างผิวชิ้นงานด้วยน้ำ น้ำยาล้างจาน และแอลกอฮอล์ และนำไปเป่าให้แห้ง

3.4 การทดสอบความแข็ง

นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดมาทดสอบความแข็งมหภาค (Macro-Hardness Test) โดยเครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test) ซึ่งเป็นการวัดความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรรูปพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมในการกด ใช้แรงในการทดสอบ 10 kgf. และ เวลาในการกด 10 วินาที โดยกดชิ้นงานละ 5 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างวัสดุ

1. วิเคราะห์โครงสร้างจุลของวัสดุภาคโดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM) โดยใช้แสงที่อยู่ในช่วงคลื่นแสงที่มองเห็นได้ มีกำลังขยายที่ 5x 10x 20x และ 50x

2. ศึกษารายละเอียดของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ และสารประกอบเชิงโลหะของไทเทเนียมโบไรด์ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) โดยมีกำลังขยาย 250x 500x 750x 1000x และ 1500x เมื่อได้ผลจากการทดสอบแล้ว นำมาวิเคราะห์ความยาวเฉลี่ยของสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic length) เปอร์เซ็นต์สัดส่วนพื้นที่ของสารประกอบเชิงโลหะ (% fraction area of Intermetallic) และ สัดส่วนพื้นที่ของเฟสเบต้า (% fraction area of Beta Phase) ด้วยโปรแกรม ImageJ

3. ศึกษาชนิดของสารประกอบโครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีอยู่ในวัสดุโดยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และทำการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุม 20 องศา ถึง 80 องศา หลังจากได้ผลการทดลอง นำข้อมูลมาพล็อตกราฟด้วยโปรแกรม Origin โดยแกน X เป็น 2θ และแกน Y เป็น Intensity

4. ศึกษาขนาดเกรนด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Backscatter Diffraction, EBSD) โดยการใช้การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ โดยกำหนด Step Size 1.2-1.5 ที่กำลังขยาย 300x ในแต่ละเกรนสามารถนำไปใช้ศึกษาสมบัติทางโครงสร้างระดับไมโครของผลึกได้ หลังจากได้ผลจากการทดสอบแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำมาวิเคราะห์ ขนาดเกรนของเฟสแอลฟา (Grain Size) และ เปอร์เซ็นต์พื้นที่เฟสแอลฟาและสารประกอบเชิงโลหะ (% Fraction Area of Alpha Phase and IMC) ด้วยโปรแกรม ImageJ

3.6 การทดสอบการสึกหรอ

- นำชิ้นงานทดสอบไปทำความสะอาดด้วยแอซีโตน (Acetone) และอบให้แห้ง แล้วนำชิ้นงานและเม็ดบอลไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักที่มีตุนิยม 4 ตำแหน่ง ในหน่วยกรัม
- ทำการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบเคลื่อนที่ไป-กลับ (Reciprocating) โดยการใช้โปรแกรม MFT18R4c ในการทดสอบ มีสภาวะการทดสอบดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการทดสอบการสึกหรอ

Condition	Ball	Preload (N)	Normal load (N)	Duration (s)	Velocity (mm/s)	Distance (mm)	Time (min)	Acceleration (mm/s ²)
1. Ti64 2. Ti64+0.5B 3. Ti64+1.0B 4. Ti64+1.5B	Alumina (Al ₂ O ₃) ขนาด 5 mm.	5	5	10	5	3	50	0.1
1. Ti64 2. Ti64+0.5B 3. Ti64+1.0B 4. Ti64+1.5B	Alumina (Al ₂ O ₃) ขนาด 5 mm.	5	10	10	5	3	50	0.1

- หลังจากทดสอบเสร็จนำชิ้นงานและเม็ดบอลไปชั่งน้ำหนัก และบันทึกผลนำค่าน้ำหนักก่อนและหลังทดสอบมาคำนวณหาค่าน้ำหนักที่หายไปภายหลังการทดสอบการสึกหรอ (Weight Loss)
- เมื่อได้ผลการทดลองแล้ว สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of Friction, COF) และ เวลาในการทดสอบ (Time)
- วิเคราะห์ผลโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล (Confocal Microscope) โดยใช้เลเซอร์ในสแกนวัด Volume Loss ของวัสดุที่ถูกขัดออกไปเพื่อนำมาคำนวณหาอัตราการสึกหรอ (Wear Rate) จากสมการที่ 2

$$W_s = \frac{V_L}{FS}$$

สมการที่ 2 อัตราการสึกหรอ โดย V_L คือ ปริมาตรการสึกหรอ (mm³)

F คือ โหลดปกติ (N)

S คือ ระยะทาง (m)

3.7 การทดสอบการกัดกร่อน

3.7.1 การเตรียมชิ้นงาน

ตัดชิ้นงานให้ได้ขนาด 1 ตารางเซนติเมตร จำนวนเงื่อนไขละ 1 ชิ้น นำมาขึ้นเรือนแบบร้อนโดยวางชิ้นงานไว้ตรงกลางเม้าส์ หลังจากขึ้นเรือนร้อนนำมาขัดกระดาษทรายเบอร์ 180 240 320 400 600 800 100 1200 และ 2000 โดยเมื่อเปลี่ยนกระดาษทรายต้องวางชิ้นงานให้ตัดกับรอยเดิม ขัดละเอียดด้วยแผ่นขัด 3 ไมโครเมตร และแผ่น OPS ล้างน้ำเปล่าให้สะอาดและเป่าให้แห้ง ขัดเม้าส์ด้านล่างออกจนเห็นชิ้นงานโลหะ

3.7.2 การทดสอบ

วิธีที่ใช้ในการทดสอบการกัดกร่อนคือวิธีเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Techniques) โดยใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat) ต่อเข้ากับเซลล์ทดสอบการกัดกร่อนชนิด 3 ขั้ว โดยอาศัยการป้อนพลังงานให้แก่โลหะที่ต้องการจะศึกษาการกัดกร่อน ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working Electrode, WE) ผ่านทางขั้วไฟฟ้าคู่ใช้งาน (Counter Electrode, CE) ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำให้กระแสไหลครบวงจร ถูกออกแบบมาเพื่อให้กระแสที่เกิดขึ้นในวงจรไหลผ่านได้ โดยป้อนศักย์ไฟฟ้าทางบวกเพิ่มขึ้น เพื่อเร่งให้เกิดการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า แล้วตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานที่เปลี่ยนไปผ่านขั้วอ้างอิงมาตรฐาน (Reference Electrode, RE) ใช้เพื่อสร้างความเสถียรให้กับการวัดค่าความต่างศักย์ในระบบ เนื่องจากเมื่อเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าใช้งานและคู่อิเล็กโทรดคู่ใช้งานจะเกิดค่าความต่างศักย์ตกคร่อมขั้วทั้งสอง ทำให้การวัดค่าความต่างศักย์บริเวณนี้มีความคลาดเคลื่อน จากนั้นจุ่มอิเล็กโทรดทั้งสามในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยเครื่องโพเทนชิโอสแตทจะเริ่มต้นด้วยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open Circuit Potential, OCP) กำหนดให้ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นที่ -0.5 V เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ทีละ 0.00122 V จนถึงค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 1.5 V โดยมีค่าอัตราการสแกน (Scan Rate) เท่ากับ 0.005 V/s จากนั้นทำการวัดผลโดยใช้โปรแกรม NOVA และวิเคราะห์พฤติกรรมของการกัดกร่อน โดยพิจารณาจากค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) และกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) ซึ่งได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า (E) และความหนาแน่นกระแส (i) หรือ กราฟโพลาไรเซชัน (Polarization)

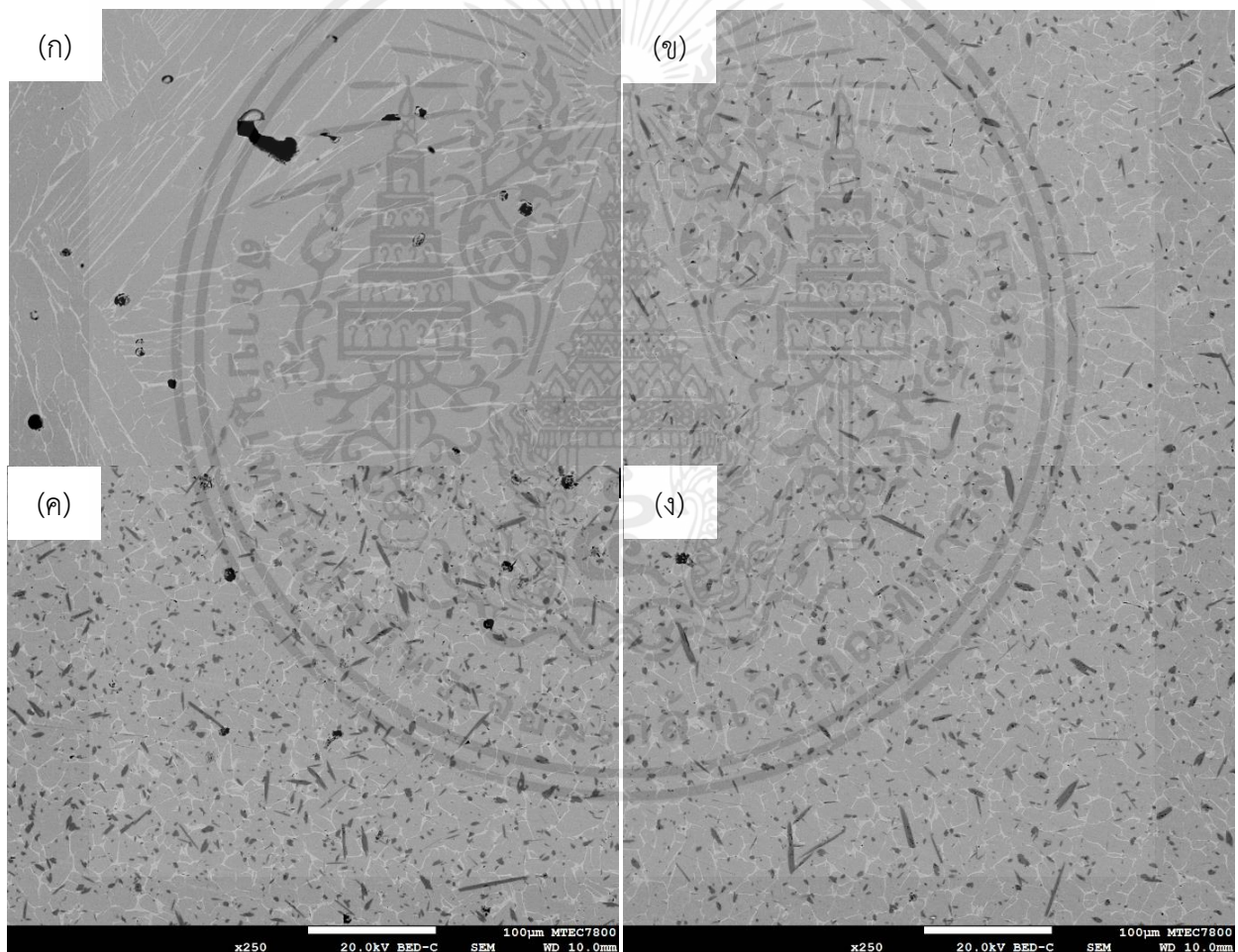
บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

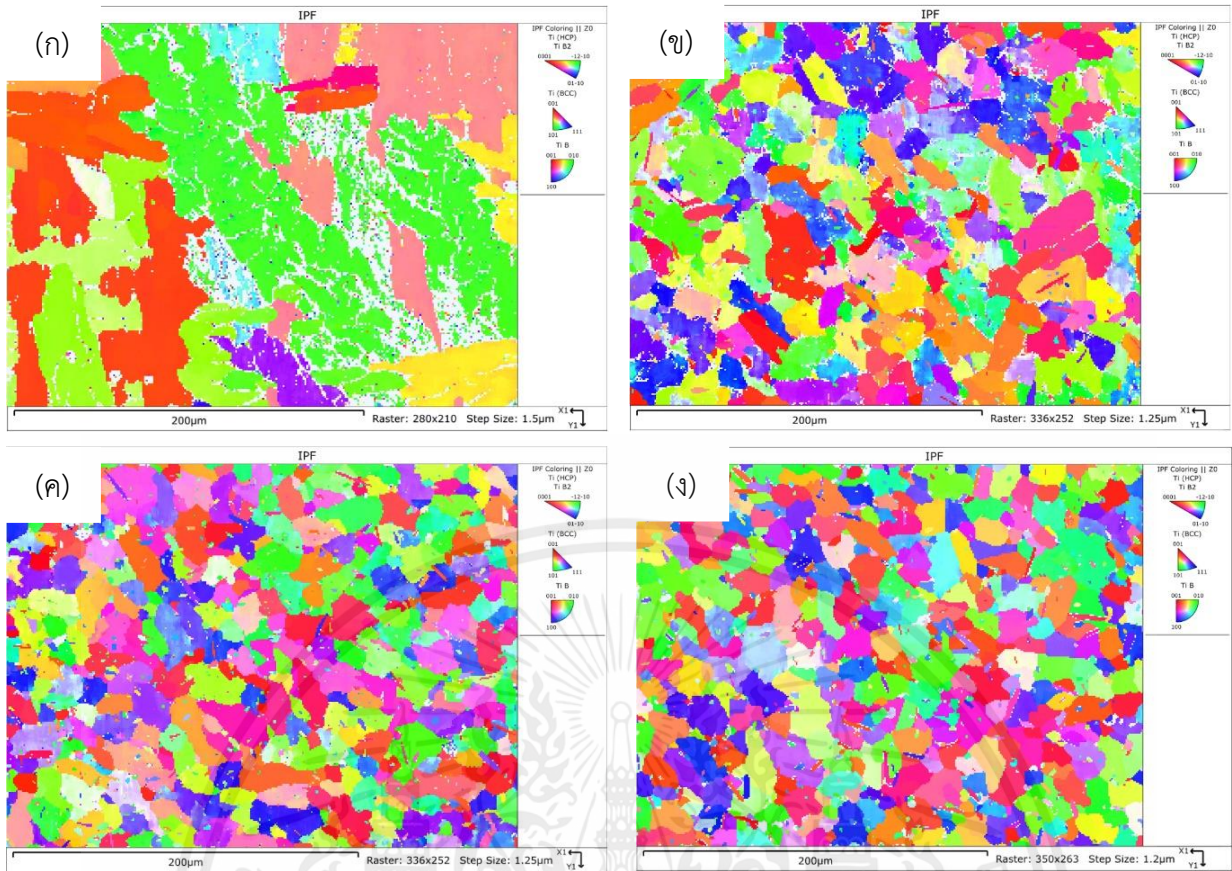
ใบบหนักกล่าวถึงผลการดำเนินงานของการพัฒนาโลหะผสมไทเทเนียมโดยการเติมธาตุโบรอนด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะ ดังแสดงในหัวข้อต่อไป

4.1 โครงสร้างจุลภาค

ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมไทเทเนียมที่เติมปริมาณโบรอนต่างกันดังนี้ โลหะผสมไทเทเนียม โลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และโลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณโบรอน



รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมไทเทเนียม ที่กำลังขยาย x250



รูปที่ 4.2 ผลการทดลองแสดงทิศทางการวางตัวของผลึก

4.1.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมไทเทเนียม

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่าโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะแบบลามิลา ดังแสดงในรูปที่ 4.1(ก) และเมื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคจากผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (EBSD) ดังแสดงในรูปที่ 4.2(ก) พบว่าโครงสร้างจุลภาคเกรนมีขนาดใหญ่และไม่สม่ำเสมอ

จากผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมไทเทเนียม พบว่าโลหะผสมไทเทเนียมมีโครงสร้างเกรนขนาดใหญ่และสัดส่วนพื้นที่ความพรุนมาก โดยขนาดเกรนมีค่าเท่ากับ 30.123 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และสัดส่วนพื้นที่ความพรุนมีค่าเท่ากับ 1.924 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4

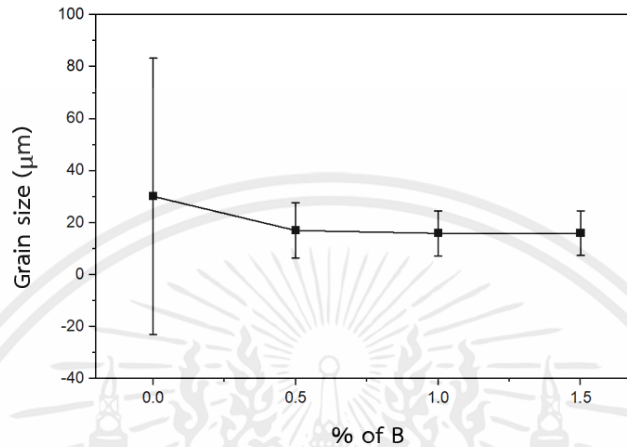
4.1.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมไทเทเนียมโบรอน

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมไทเทเนียมโบรอนผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่าโครงสร้างจุลภาคประกอบไปด้วยสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic) มีลักษณะเป็นเส้นยาวคล้ายเข็มกระจายตัวอยู่บนเนื้อพื้นไทเทเนียม ดังแสดงในรูปที่ 4.1(ข)(ค)(ง) และเมื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคจากผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (EBSD) ดังแสดงในรูปที่ 4.2(ข)(ค)(ง) พบว่าโครงสร้างจุลภาคเกรนมีขนาดเล็กลง

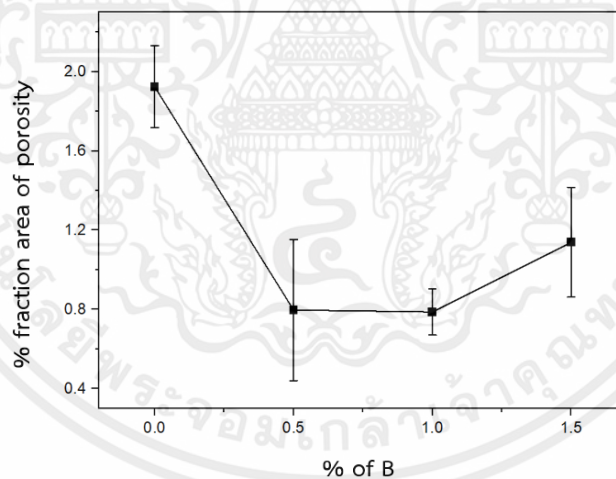
จากผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมไทเทเนียมโบรอน พบว่าโลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีโครงสร้างเกรนขนาดเล็กลงและสัดส่วนพื้นที่ความพรุนลดลง โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

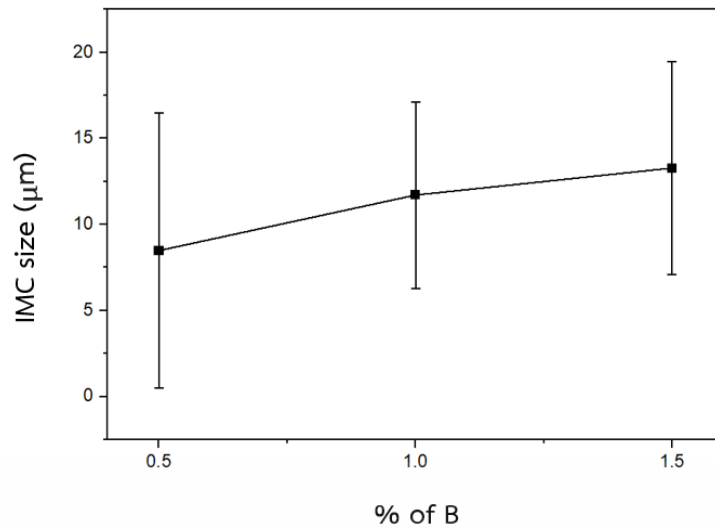
ขนาดเกรนมีค่าเท่ากับ 16.992 15.876 และ 15.933 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และสัดส่วนพื้นที่ความพรุนมีค่าเท่ากับ 0.797 0.787 และ 1.139 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และพบว่าสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic) ขนาดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 8.48 11.71 และ 13.28 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และมีสัดส่วนพื้นที่ของสารประกอบเชิงโลหะเฉลี่ยเท่ากับ 3.26 9.95 และ 7.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.6



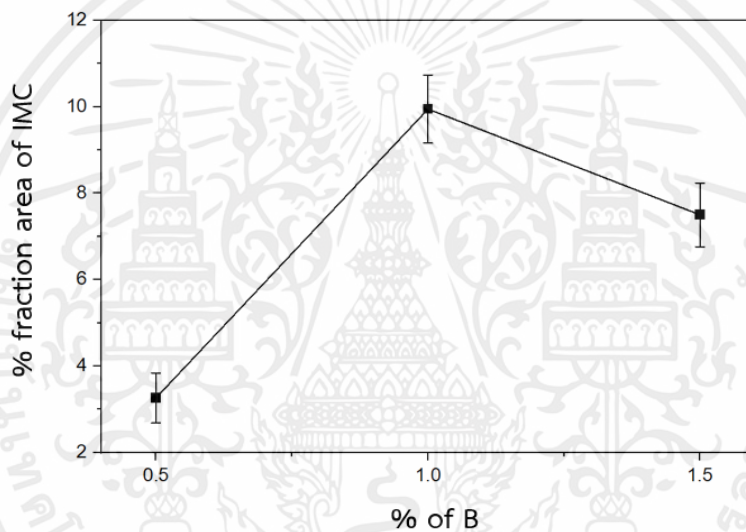
รูปที่ 4.3 ผลการทดลองแสดงขนาดของเกรน



รูปที่ 4.4 ผลการทดลองแสดงสัดส่วนพื้นที่ความพรุน



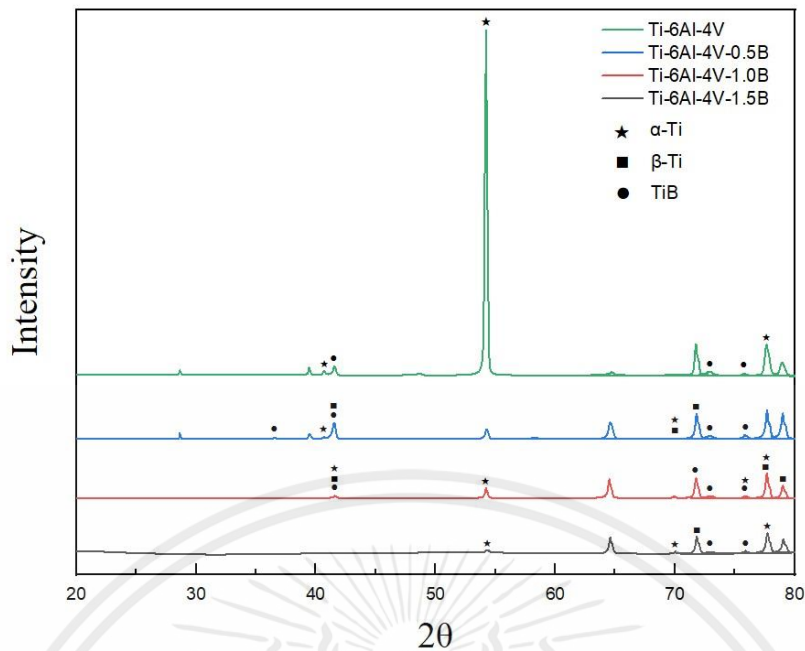
รูปที่ 4.5 ผลการทดลองแสดงขนาดเฉลี่ยของสารประกอบเชิงโลหะ



รูปที่ 4.6 ผลการทดลองแสดงสัดส่วนพื้นที่ของสารประกอบเชิงโลหะ

4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมไทเทเนียม โลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก โลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และโลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนโดยใช้รังสีเอ็กซ์ (XRD) ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าโลหะผสมไทเทเนียมเกิดการก่อตัวของแอลฟาเฟสและเบต้าเฟส และเมื่อเติมโบรอนพบว่า เกิดการก่อตัวของแอลฟาเฟส เบต้าเฟส และสารประกอบเชิงโลหะไทเทเนียมโบไรด์



รูปที่ 4.7 ผลการทดลองผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนโดยใช้รังสีเอ็กซ์

4.3 ประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียดของโลหะผสมไทเทเนียม

ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมไทเทเนียม พบว่าเกรนมีขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 เมื่อเติมโบรอน 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเกรนมีขนาดเล็กลงและรูปร่างที่สม่ำเสมอขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3

4.3.1 อิทธิพลของการเติมโบรอนต่อการปรับสภาพเกรนละเอียดของโลหะผสมไทเทเนียม

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมไทเทเนียม พบว่าเกรนมีขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 เมื่อทำการเติมโบรอน 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่งผลให้เกรนมีขนาดเล็กลง ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และเมื่อเติมโบรอน 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่งผลให้เกรนมีขนาดเล็กลงยิ่งขึ้นและมีรูปร่างสม่ำเสมอมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3

จากผลการทดลองพบว่า การเติมโบรอนสามารถช่วยในการปรับสภาพเกรนละเอียดของโลหะผสมไทเทเนียม และการเติมโบรอน 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักทำให้เกรนมีความละเอียดยิ่งขึ้น และรูปร่างสม่ำเสมอมากขึ้น แต่เมื่อเติมมากกว่า 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะไม่ส่งผลให้เกรนมีความละเอียดขึ้น

4.4 สมบัติเชิงกลของโลหะผสมไทเทเนียม

4.4.1 สมบัติความแข็งเมื่อปริมาณโบรอนต่างกัน

เมื่อศึกษาสมบัติความแข็งของโลหะผสมไทเทเนียม ด้วยการเติมโบรอน 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในโลหะผสมไทเทเนียมเพื่อให้เกรนมีขนาดเล็กลงซึ่งมีผลต่อการเสริมสร้างความแข็งแก่โลหะผสมไทเทเนียม ซึ่งมีการวัดค่าความแข็งในระดับจุลภาค โดยใช้เครื่องกดความแข็ง Vickers (Mitutoyo 810-969A - HM-113 MICRO HARDNESS TESTER) ที่น้ำหนักโหลด 1 Kgf. ในการทดสอบ

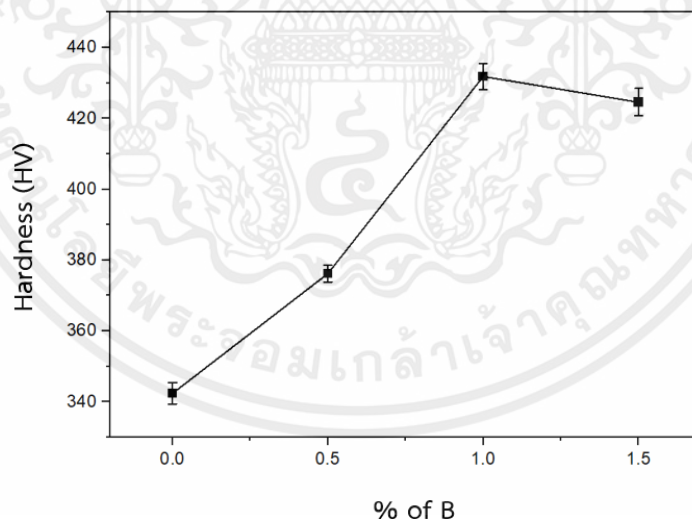
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1.1 อิทธิพลของโบรอนที่มีผลต่อความแข็งของโลหะผสมไทเทเนียม

ผลการทดสอบความแข็งของโลหะผสมไทเทเนียม (Ti-6Al-4V) โลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Ti-6Al-4V-0.5B) โลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Ti-6Al-4V-1.0B) และโลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Ti-6Al-4V-1.5B) เมื่อพิจารณาค่าความแข็งเฉลี่ยของโลหะผสมไทเทเนียมที่ปริมาณการเติมโบรอนต่างกัน พบว่าโลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งเฉลี่ย HV สูงสุด

จากผลการทดสอบความแข็ง HV ของโลหะผสมไทเทเนียม พบว่าค่าความแข็งเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 342.40 HV ดังแสดงในรูปที่ 4.9 เมื่อเติมโบรอน 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความแข็งเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 376.20 431.83 และ 424.57 HV ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณโบรอนที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติมโบรอนมากกว่า 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะทำให้มีค่าความแข็งลดลง

เมื่อพิจารณาค่าความแข็งเฉลี่ยของโลหะผสมไทเทเนียมที่เติมปริมาณโบรอนต่างกัน พบว่าเมื่อเติมโบรอน 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในโลหะผสมไทเทเนียม มีค่าความแข็งเฉลี่ย HV สูงสุด เป็นผลมาจากการเติมโบรอน 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคมีขนาดเกรนเล็กลง เกิดการก่อตัวของสารประกอบเชิงโลหะไทเทเนียมโบไรด์มากและมีสัดส่วนพื้นที่ความพรุนน้อย และเมื่อพิจารณาค่าความแข็งของโลหะผสมไทเทเนียมที่ไม่เติมโบรอน พบว่าค่าความแข็งเฉลี่ย HV มีค่าน้อย เป็นผลมาจากโครงสร้างจุลภาคมีขนาดเกรนใหญ่ ไม่มีสารประกอบเชิงโลหะไทเทเนียมโบไรด์และมีสัดส่วนพื้นที่ความพรุนมาก



รูปที่ 4.8 ผลการทดลองความแข็งของ

4.4.2 สมบัติความต้านทานการสึกหรอเมื่อปริมาณโบรอนต่างกัน

เมื่อศึกษาสมบัติความต้านทานการสึกหรอของโลหะผสมไทเทเนียม ด้วยการเติมโบรอน 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในโลหะผสมไทเทเนียมเพื่อให้เกรนมีขนาดเล็กลงซึ่งมีผลต่อการเสริมสร้างความต้านทานการสึกหรอแก่โลหะผสมไทเทเนียม โดยใช้เครื่องเครื่องทดสอบไทรโบมิเตอร์ (Tribometer)

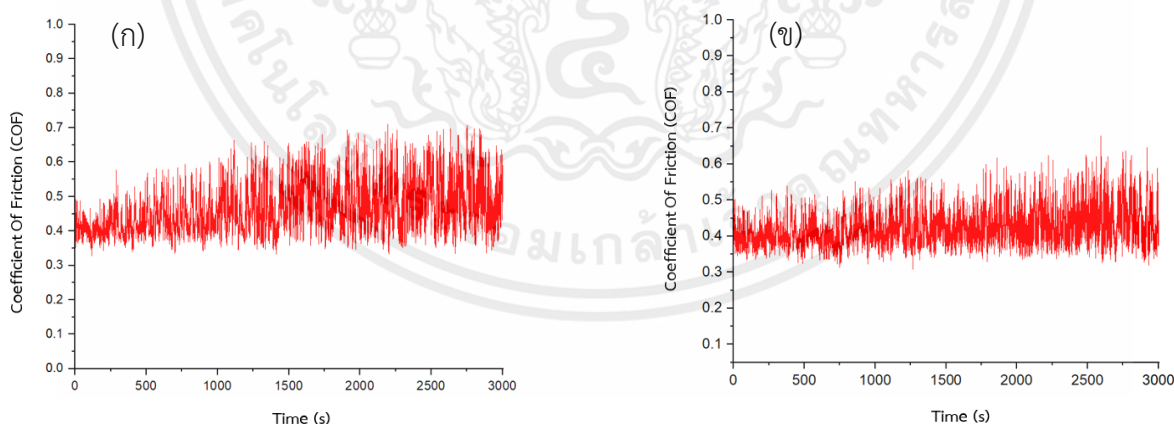
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

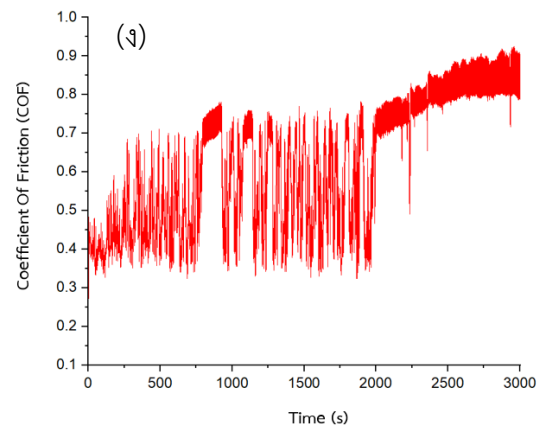
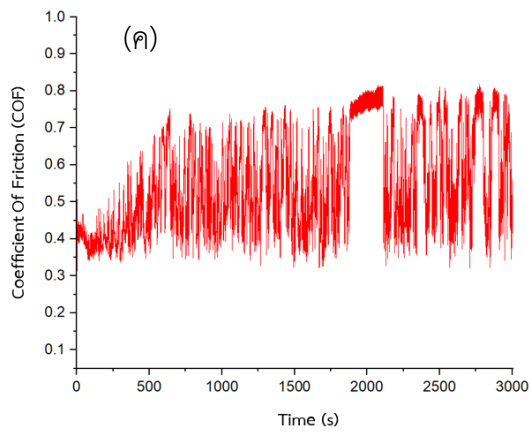
4.4.2.1 อิทธิพลของโบรอนที่มีผลต่อความแข็งของโลหะผสมไทเทเนียมภายใต้โหลด 5 นิวตัน

ผลการทดสอบความต้านทานการสึกหรอของโลหะผสมไทเทเนียม (Ti-6Al-4V) โลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Ti-6Al-4V-0.5B) โลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Ti-6Al-4V-1.0B) และโลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Ti-6Al-4V-1.5B) เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของโลหะผสมไทเทเนียมที่ปริมาณการเติมโบรอนต่างกัน พบว่าโลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงสุด

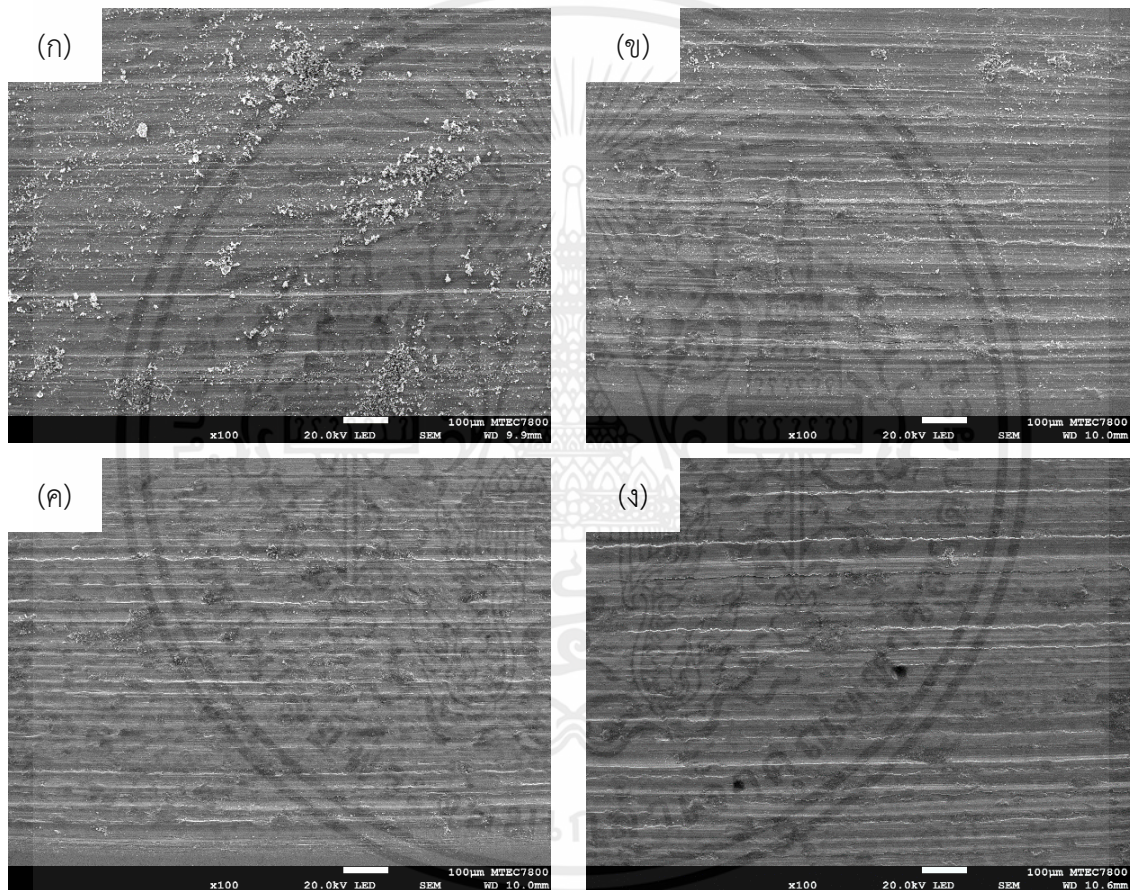
จากผลการทดสอบความต้านทานการสึกหรอของโลหะผสมไทเทเนียม พบว่าค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าประมาณ 0.4690 ดังแสดงในรูปที่ 4.9 เมื่อเติมโบรอน 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าประมาณ 0.4239 0.5471 และ 0.6223 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณโบรอนที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียของโลหะผสมไทเทเนียมที่เติมปริมาณโบรอนต่างกัน พบว่าโลหะผสมไทเทเนียมมีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียเท่ากับ 0.03% เมื่อเติมโบรอน 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในโลหะผสมไทเทเนียมพบว่า มีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียเท่ากับ 0.033% 0.023% และ 0.027% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเติมโบรอนถึง 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะมีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียน้อยที่สุด และเมื่อเติมโบรอนถึง 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากโลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีความแข็งมากกว่าโลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักโลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีความแข็งมากที่สุด





รูปที่ 4.9 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับระยะเวลาทดสอบ



รูปที่ 4.10 แสดงรอยการสึกหรอภายใต้โหลด 5 นิวตัน ที่กำลังขยาย x100

4.4.2.2 อิทธิพลของโบรอนที่มีผลต่อความแข็งแรงของโลหะผสมไทเทเนียมภายใต้โหลด 10 นิวตัน

ผลการทดสอบความต้านทานการสึกหรอของโลหะผสมไทเทเนียม (Ti-6Al-4V) โลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Ti-6Al-4V-0.5B) โลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Ti-6Al-4V-1.0B) และโลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Ti-6Al-4V-1.5B) เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของโลหะผสมไทเทเนียมที่ปริมาณการเติมโบรอนต่างกัน พบว่าโลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงสุด

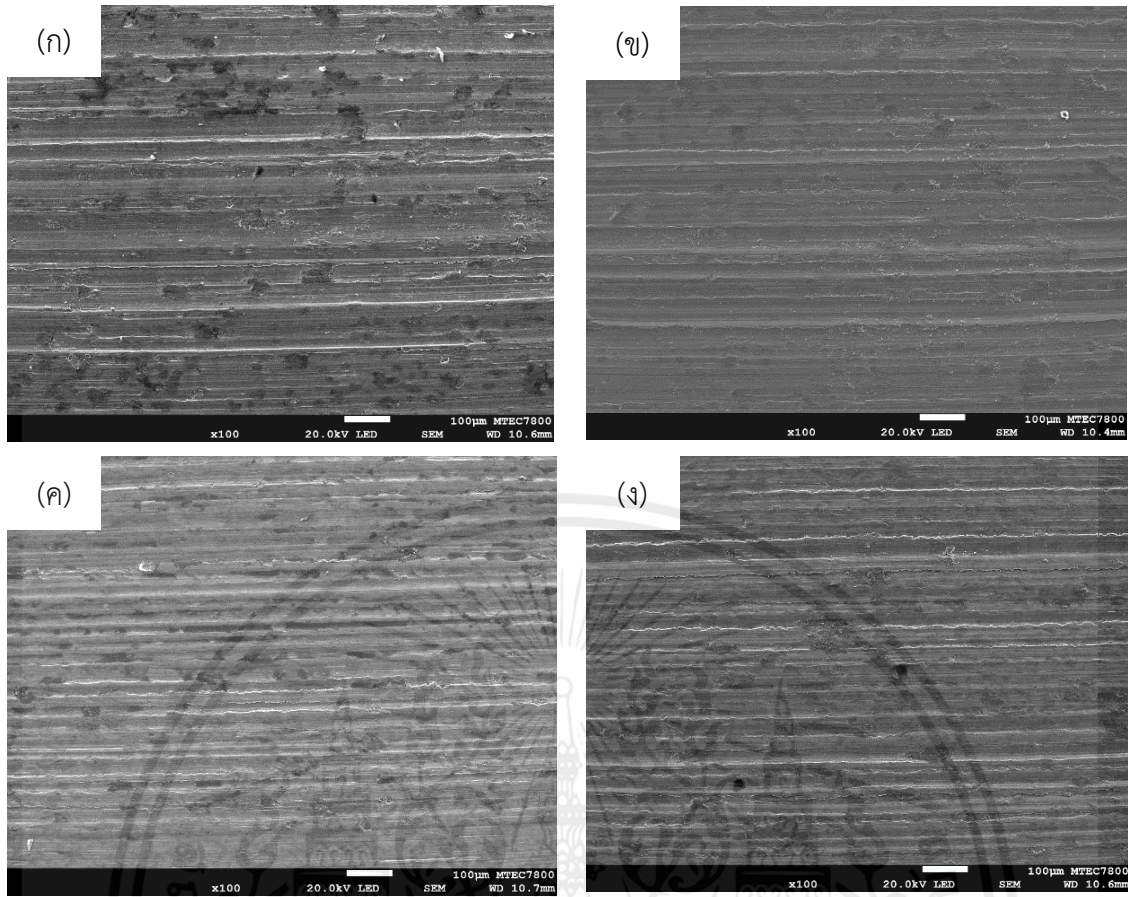
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบความต้านทานการสึกหรอของโลหะผสมไทเทเนียม พบว่าค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าประมาณ 0.4349 ดังแสดงในรูปที่ 4.11 เมื่อเติมโบรอน 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าประมาณ 0.4201 0.5111 และ 0.4568 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณโบรอนที่เพิ่มขึ้น

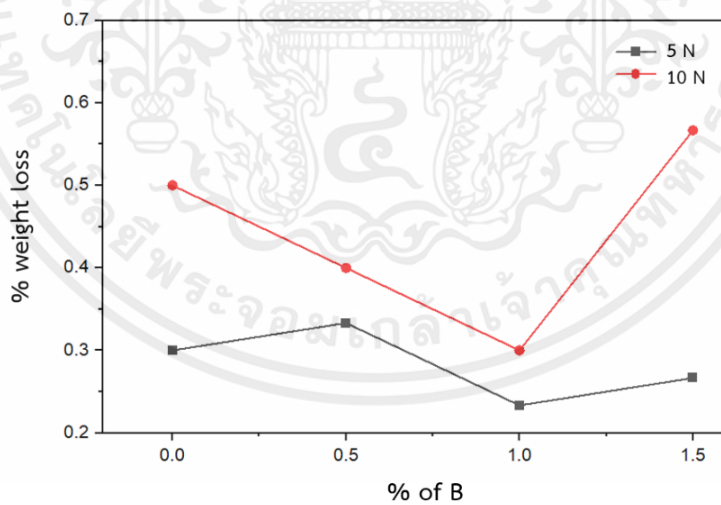
เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียของโลหะผสมไทเทเนียมที่เติมปริมาณโบรอนต่างกัน พบว่าโลหะผสมไทเทเนียมมีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียเท่ากับ 0.05% เมื่อเติมโบรอน 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในโลหะผสมไทเทเนียมพบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียเท่ากับ 0.04% 0.03% และ 0.057% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเติมโบรอนถึง 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะมีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียน้อยที่สุด และเมื่อเติมโบรอนถึง 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากโลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีความแข็งมากกว่าโลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



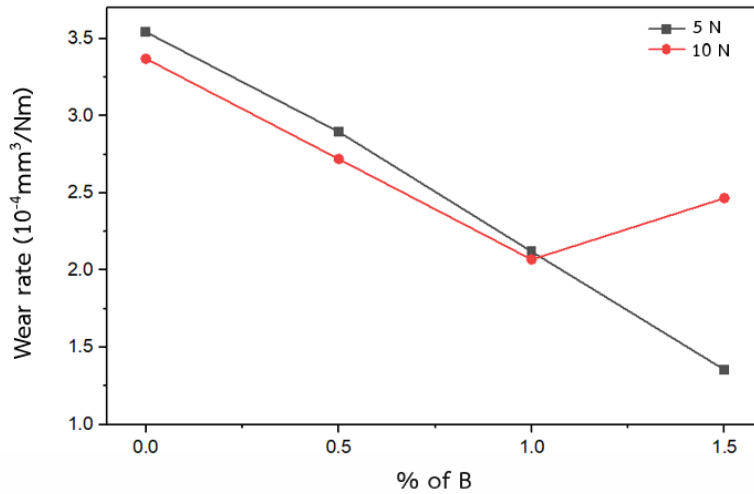
รูปที่ 4.11 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายใต้โหลด 10 นิวตัน ที่กำลังขยาย x100



รูปที่ 4.12 แสดงรอยการสึกหรอภายใต้โหลด 10 นิวตัน ที่กำลังขยาย x100



รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียกับเปอร์เซ็นต์โบรอนภายใต้โหลด 5 และ 10 นิวตัน



รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอกับเปอร์เซ็นต์โบรอนภายใต้โหลด 5 และ 10 นิวตัน

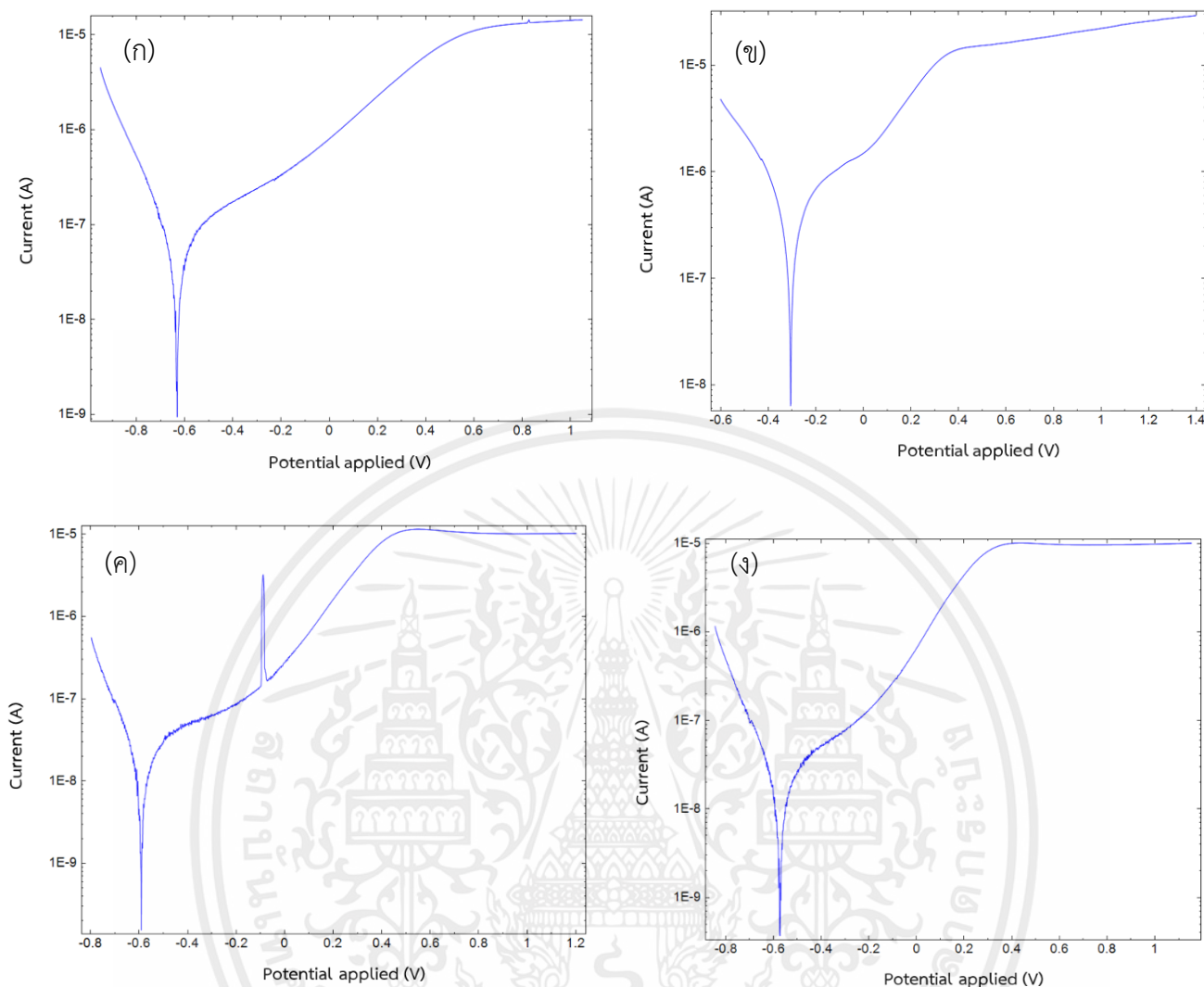
4.5 ความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมไทเทเนียม

4.5.1 ความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมไทเทเนียมด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า (Electrochemical techniques)

ในการศึกษาสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานตัวอย่างของโลหะผสมไทเทเนียม โลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และโลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยวิธีการทดสอบ Electrochemical ควบคุมปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดจากการกัดกร่อน

ผลการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะผสมไทเทเนียม โลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และโลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat) และเครื่องวิเคราะห์ทางเคมีสำหรับงานวิจัย (Potentiostat/Galvanostat) แสดงผลเป็นกราฟเส้นโค้งโพลาริเซชัน โดยแนวโน้มกราฟที่เกิดขึ้นนำไปสู่การหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) จากจุดตัดของความชันกราฟ

เมื่อพิจารณาเส้นโค้งโพลาริเซชันของโลหะผสมไทเทเนียมกับโลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าให้กับโลหะผสมไทเทเนียมกับโลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (ก)(ข) แสดงว่ามีการกัดกร่อนที่ค่อนข้างรุนแรงเกิดขึ้นบนผิวและ อัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นตามศักย์ไฟฟ้าด้วย เป็นผลมาจากไม่มีการสร้างฟิล์มบางขึ้นมาปกป้องผิวของโลหะจากการกัดกร่อน และเมื่อพิจารณาเส้นโค้งโพลาริเซชันของโลหะผสมไทเทเนียมที่เติมโบรอน 1.0 กับ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าให้กับโลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.0 กับ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เห็นว่ากระแสไฟฟ้าของโลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.0 กับ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีช่วงคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (ค)(ง) แสดงว่ามีการกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอ ทำให้เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้า อัตราการกัดกร่อนไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้อีก



รูปที่ 4.15 เส้นโค้งโพลาริเซชันของ

ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์จากกราฟ Polarization ของโลหะผสมไทเทเนียม โลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และโลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ผลจากเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า	สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	
	E_{corr} (V)	I_{corr} (A/cm ²)
Ti-6Al-4V	-627.780×10^{-3}	38.4440×10^{-9}
Ti-6Al-4V-0.5B	-305.010×10^{-3}	1.75340×10^{-7}
Ti-6Al-4V-1.0B	-599.420×10^{-3}	15.5920×10^{-9}
Ti-6Al-4V-1.5B	-570.860×10^{-3}	3.87980×10^{-9}

จากการทดสอบพบว่าโลหะผสมไทเทเนียมมีค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ -627.780 mV และมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนเท่ากับ 38.4440 nA/cm^3 โลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ -305.010 mV และมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนเท่ากับ $17.5340 \text{ }\mu\text{A/cm}^3$ โลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ -599.420 mV และมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนเท่ากับ 15.5920 A/cm^3 โลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ -570.860 mV และมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนเท่ากับ 3.87980 nA/cm^3



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการพัฒนาโลหะผสมไทเทเนียม ด้วยการเติมโบรอน 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้ผลการทดลองดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 โลหะผสมไทเทเนียมมีโครงสร้างแบบลามาิลลา

การเติมโบรอนส่งผลให้เกิดการก่อตัวของสารประกอบเชิงโลหะไทเทเนียมโบไรด์ที่มีลักษณะเส้นยาว คล้ายเข็มกระจายตัวบนเนื้อพื้นไทเทเนียม จากผลการทดลองพบว่า การเติมโบรอน 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีสัดส่วนพื้นที่ของสารประกอบเชิงโลหะมากที่สุด 9.95 เปอร์เซ็นต์

5.1.2 การเติมโบรอนส่งผลให้เกรนมีขนาดเล็กลง

จากโลหะผสมไทเทเนียมที่ไม่เติมโบรอนมีขนาดเกรน 30.124 ไมโครเมตร เมื่อเติมโบรอน 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักส่งผลให้เกรนมีขนาดเล็กที่สุด คือ 15.876 ไมโครเมตร

5.1.3 โลหะผสมไทเทเนียมมีสัดส่วนพื้นที่ความพรุน 1.924 เปอร์เซ็นต์ การเติมโบรอน 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักส่งผลให้มีสัดส่วนพื้นที่ความพรุนลดลงมากที่สุดเหลือ 0.797 เปอร์เซ็นต์

5.1.4 การเติมโบรอนส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

จากการทดสอบพบว่าโลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีค่าความแข็งแรงมากที่สุด 431.83 HV เมื่อเทียบกับโลหะผสมไทเทเนียมที่ไม่เติมโบรอนมีค่าความแข็งแรง 342.40 HV

5.1.5 การเติมโบรอนส่งผลให้มีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้น

ซึ่งอาจเป็นผลมาจากโครงสร้างจุลภาคที่เกิดเฟสแข็งและตามความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น จากการทดสอบความแข็งแรงจะเห็นว่า โลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีค่าความแข็งแรงมากที่สุด ส่งผลให้อัตราการสึกหรอต่ำ สามารถต้านทานการสึกหรอที่ดีที่สุด และภายใต้โหลด 5 นิวตัน โลหะผสมไทเทเนียมโบรอน 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีอัตราการสึกหรอน้อยที่สุด

5.1.6 การเติมโบรอน 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักลงในโลหะผสมไทเทเนียมส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนดีขึ้น เป็นผลมาจากค่าศักย์ไฟฟ้าสูงแต่ความหนาแน่นต่ำทำให้มีอัตราการกัดกร่อนต่ำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาควบคุมสภาวะความร้อนในกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะ เพื่อป้องกันการเกิดพื้นที่ของไทเทเนียมโบไรด์ที่มากเกินไป ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลของโลหะผสม

5.2.2 ควรศึกษาควบคุมขนาดเกรน โดยการเพิ่มปริมาณโบรอนหรือการปรับปรุงกระบวนการผลิต ในการพัฒนาโลหะผสมไทเทเนียม สำหรับการประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมที่ต้องการความแข็งแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 ควรศึกษาและทดสอบการใช้งานโลหะผสมไทเทเนียมโบรอนในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Orley Milagres Ferri (2011). The Influence of a Small Boron Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Fabricated by Metal Injection Moulding. Advanced Engineering Materials. 10
- [2] กล้องจุลทรรศน์. A Collection of Microscopes of Various Periods. Mahidol Siriraj (287). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : https://www2.si.mahidol.ac.th/siriraj130years/media/timeline/441/2454_Microscope.pdf
- [3] Nano technology. Electron microscope. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <https://il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>
- [4] นาท เสาวดี. การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับแบบ 3 มิติโดยใช้ลำไอออน. วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ว.วิทย์. มข. 42(2) 303-312 (2557) 1-2
- [5] THAI PARKERIZING. การทดสอบความแข็งของวัสดุ (Hardness Test). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <https://www.thaiparker.co.th/th/articles/laboratory-services/hardness-test-methods>
- [6] อภิชาติ พานิชกุล. การอบชุบทางความร้อนของโลหะ (Heat Treatment of Metals). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://personal.sut.ac.th/heattreatment/context/Measurement_Of_Hardness.html
- [7] M.J. Bermingham (2015). Controlling the microstructure and properties of wire arc additive manufactured Ti-6Al-4V with trace boron additions. Queensland Centre for Advanced Materials Processing and Manufacturing
- [8] V.M. Imayev (2015). Effect of boron additions and processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy Ti-6.5Al-3.3Mo-0.3Si. Materials Science & Engineering A 641 (2015) 71-83
- [9] Jun Zhu (2003). Influence of boron addition on microstructure and mechanical properties of dental cast titanium alloys. Materials Science and Engineering A339 (2003) 53-62.
- [10] J.H. Luan (2015). Effects of boron additions and solutionizing treatments on microstructures and ductility of forged Ti-6Al-4V alloys. Journal of Alloys and Compounds 624 (2015) 170-178
- [11] S.A. MANTRI (2018). Effect of Boron Addition on the Mechanical Wear Resistance of Additively Manufactured Biomedical Titanium Alloy. The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2018
- [12] Yu Yang (2014). Effect of Trace Boron Addition on Microstructure and Properties of as-Cast Ti-6Al-4V Alloy. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(12): 2908-2911.

- [13] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เพื่อการวิจัยขั้นสูง. X-ray Diffractometer (XRD). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.sat.tu.ac.th/csear/service/19/>
- [14] สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://www.slri.or.th/bdd/th/22-บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์/71-x-ray-diffractometer-xrd.html>
- [15] ณปภัช พิมพดี. การกัดกร่อนและการป้องกัน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.scimath.org/lesson-chemistry/item/7182-2017-06-05-14-44-28>
- [16] บริษัท เวล เวลธ์ จำกัด. ลักษณะการกัดกร่อน. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.wellwealth-thai.com/15309481/ลักษณะของการกัดกร่อน>
- [17] อนันต์ มีนาค (2549). การสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและการติดตามสภาพ. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ 2 ฉบับพิเศษ (ฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี) สิงหาคม 2549
- [18] นายสุกัลย์ อินทร์พรม. การออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิสก์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ปีการศึกษา 2560
- [19] Wang Xiang (2012). Effect of boron addition on microstructure and mechanical properties of TiC/Ti6Al4V composites. Materials and Design 36 (2012) 41–46
- [20] Kavita Kanjanamekanant (2020). Titanium and Titanium Alloys in Implant Dentistry. 1Department of Prosthodontics, Faculty of Dentistry, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand
- [21] Jungho CHOE (2016). Effect of Minor Boron Addition on the Fatigue Strength and High Temperature Properties of Injection Molded Ti-6Al-4V Compacts. 2016 Volume 63 Issue 7 Pages 451-456
- [22] Thomas Ebel (2011). Ti-6Al-4V-0.5B--A Modified Alloy for Implants Produced by Metal Injection Molding. ADVANCED ENGINEERING MATERIALS 2011, 13, No. 12
- [23] N. Poondla (2009). A study of the microstructure and hardness of two titanium alloys: Commercially pure and Ti-6Al-4V. Journal of Alloys and Compound. 162
- [24] Luis Vilhena (2019). Tribocorrosion of different biomaterials under reciprocating sliding conditions in artificial saliva. lubrication science Pages 1-17

ภาคผนวก ก

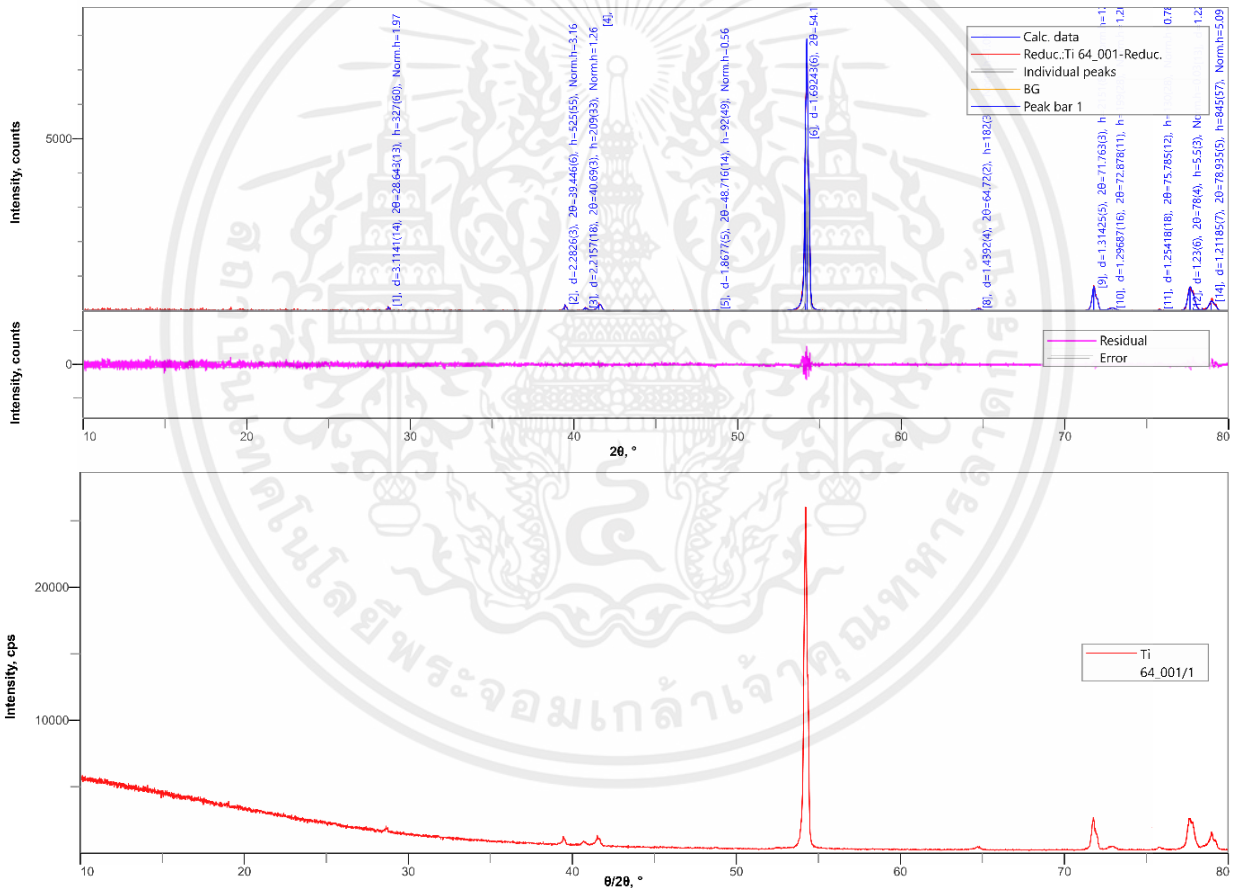


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

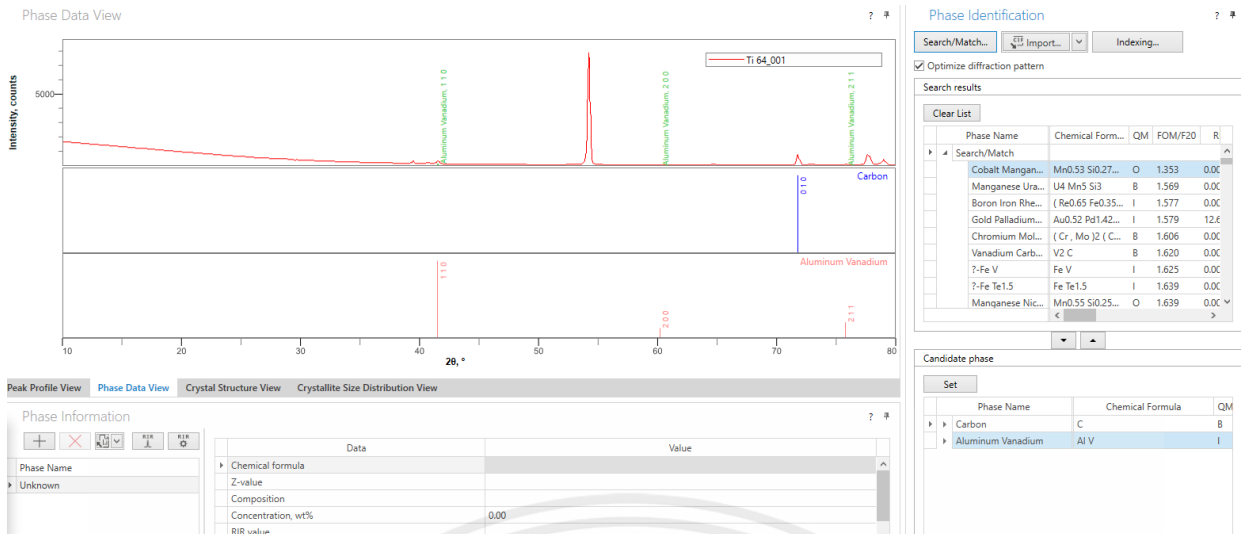
ตารางที่ ก ผลการทดสอบความแข็ง

Condition	Hardness (HV)			Average Hardness (HV)	Standard deviation
	Test 1	Test 2	Test 3		
Ti-6Al-4V	345.7	339.8	341.7	342.4	3.01
Ti-6Al-4V +0.5B	377.5	373.5	377.6	376.2	2.34
Ti-6Al-4V +1.0B	434.5	433.4	427.6	431.83	3.71
Ti-6Al-4V +1.5B	426.8	420.1	426.8	424.57	3.87

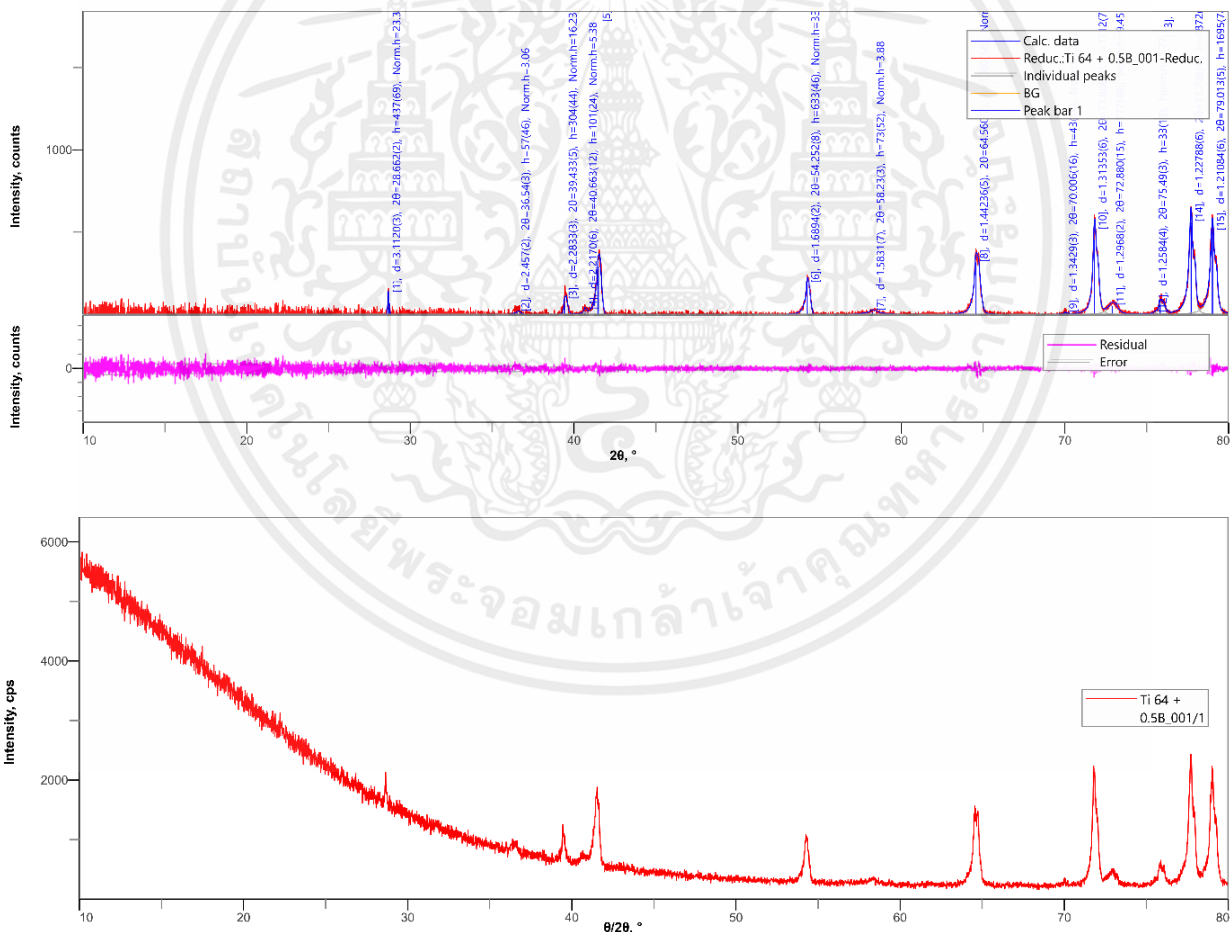
ข้อมูลดิบจากการทำ XRD บน Ti-6Al-4V



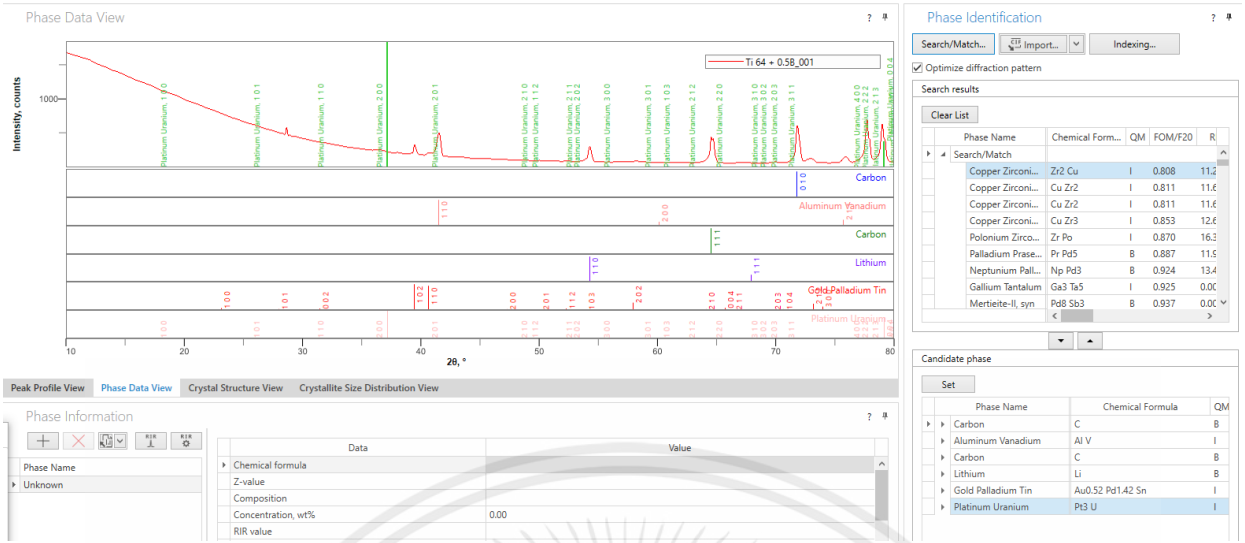
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



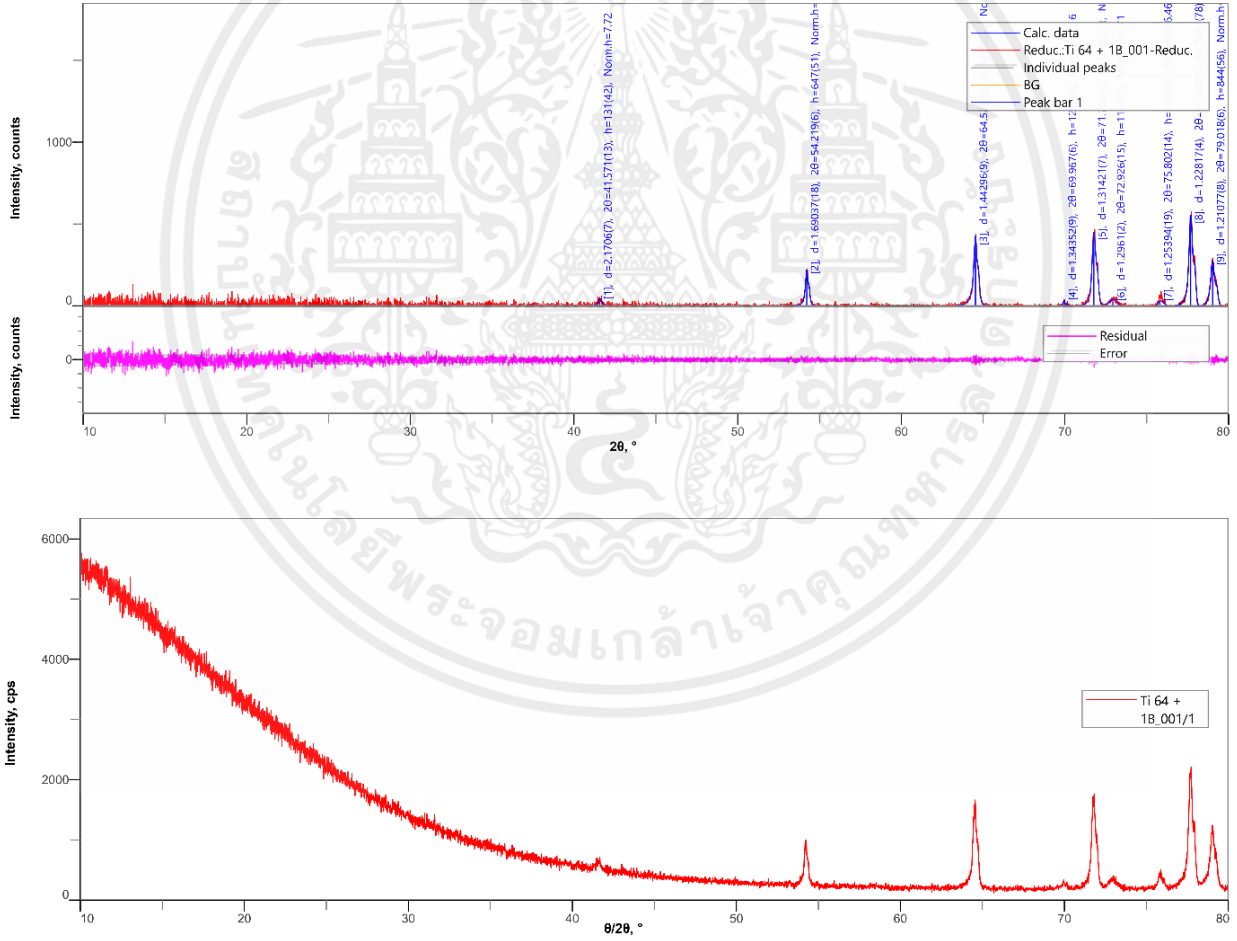
ข้อมูลดิบจากการทำ XRD บน Ti-6Al-4V +0.5B



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข้อมูลดิบจากการทำ XRD บน Ti-6Al-4V +1.0B



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Phase Identification

Search/Match... Import... Indexing...

Optimize diffraction pattern

Search results

Clear List

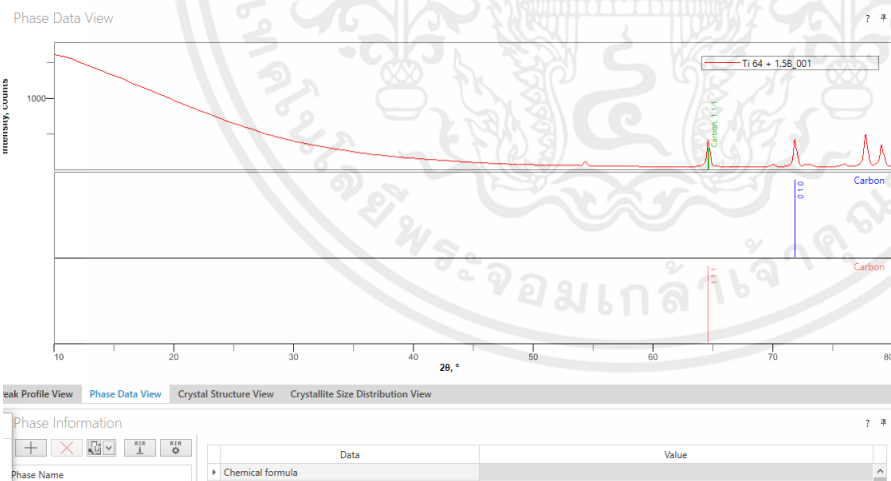
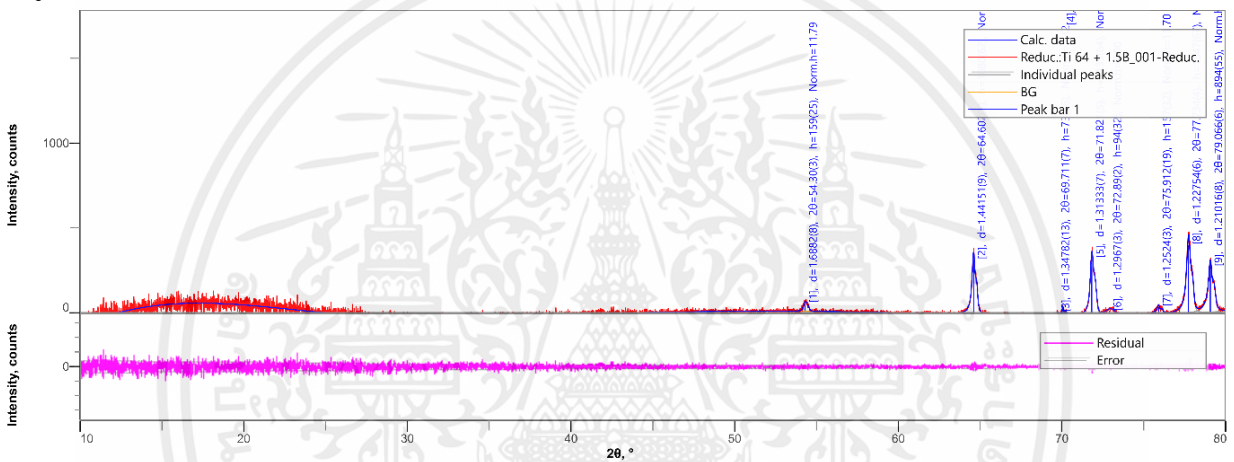
Phase Name	Chemical Form.	QM	FOM/F20	R
Uranium Chlori...	U (N H) Cl	B	1.489	0.00
Hafnium Platin...	Hf Pt	B	1.638	0.00
Boron Cobalt R...	(Co, Re)7 B4	O	1.655	0.00
?-H3 Ni20 B6	H3 Ni20 B6	I	1.696	0.00
Cobalt Zinc	Co5 Zn21	O	1.715	0.00
Aluminum Iron...	(AlO, 168 Fe0.8...	B	1.734	0.00
Molybdenum N...	Mo2 Ni3 P	O	1.736	0.00
?-Fe Te1.5	Fe Te1.5	I	1.776	0.00
Boron Beryllium	B Be4	I	1.779	0.30

Candidate phase

Set

Phase Name	Chemical Formula	QM
Carbon	C	B
Carbon	C	B
Lithium	Li	B

ข้อมูลดิบจากการทำ XRD บน Ti-6Al-4V +1.5B



Phase Identification

Search/Match... Import... Indexing...

Optimize diffraction pattern

Search results

Clear List

Phase Name	Chemical Form.	QM	FOM/F20	R
Uranium Chlori...	U (N H) Cl	B	1.502	0.00
Cobalt Zinc	Co5 Zn21	O	1.635	0.00
Hafnium Platin...	Hf Pt	B	1.674	0.00
?-Cd5 Ni	Cd5 Ni	O	1.738	0.00
Germanium Ma...	Ge3 Mn4 Ni5	O	1.778	0.00
Hafnium Tin	Hf5 Sn3	B	1.788	0.00
Boron Holmium	Ho B4	B	1.789	0.00
Aluminum Cop...	Al Cu Ho	B	1.802	0.00
?-Fe Te1.5	Fe Te1.5	I	1.808	0.00

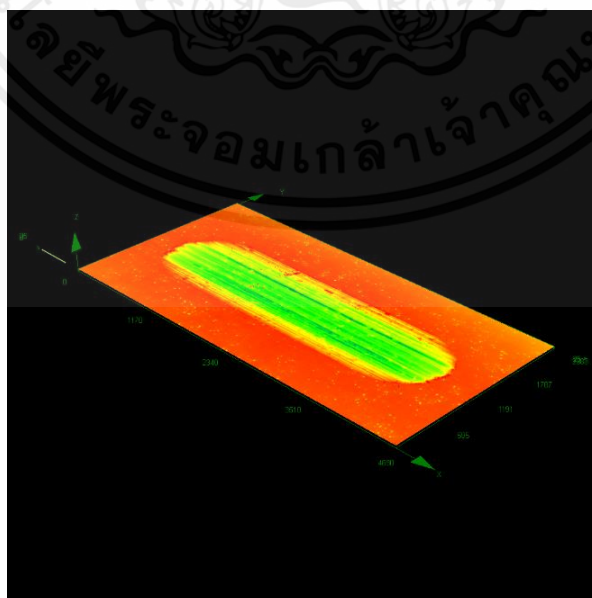
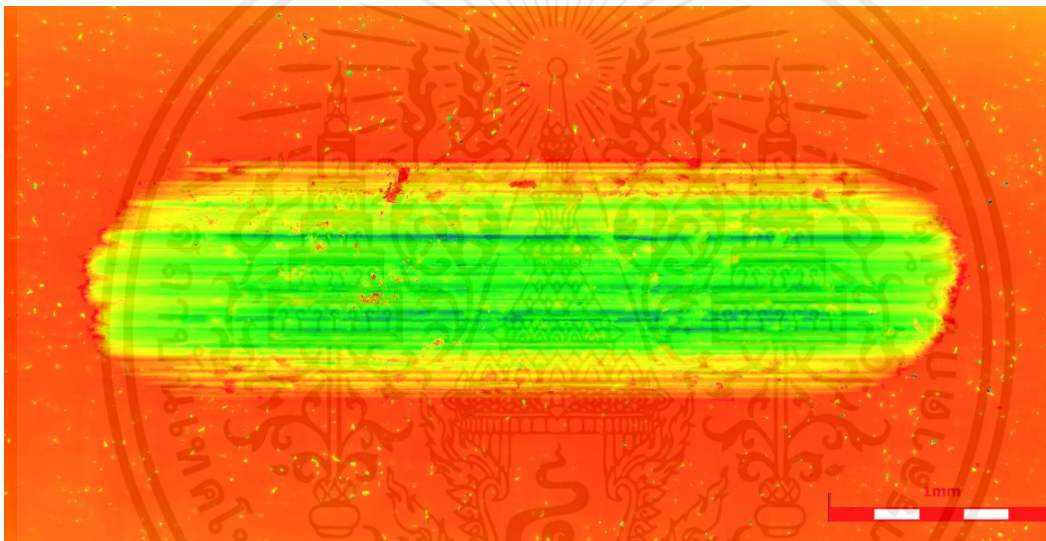
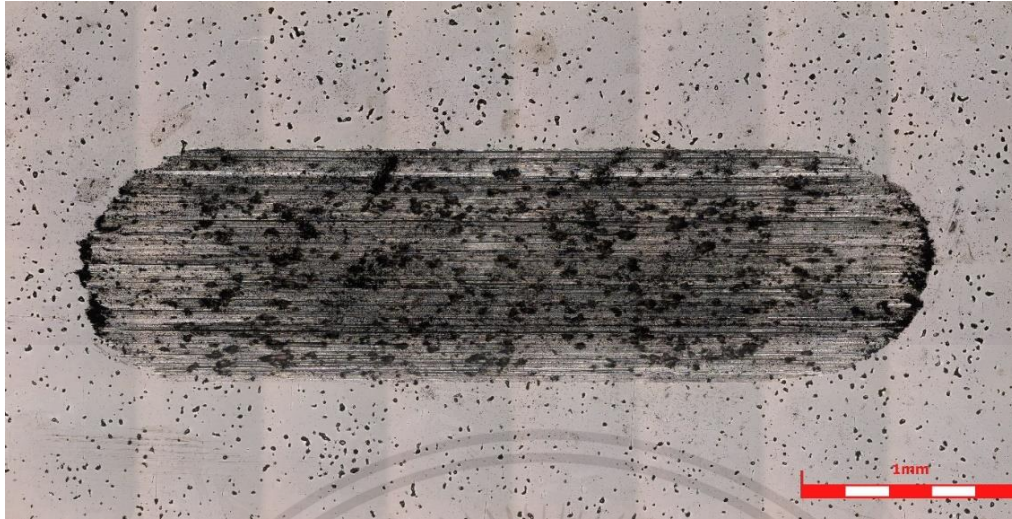
Candidate phase

Set

Phase Name	Chemical Formula	QM
Carbon	C	B
Carbon	C	B

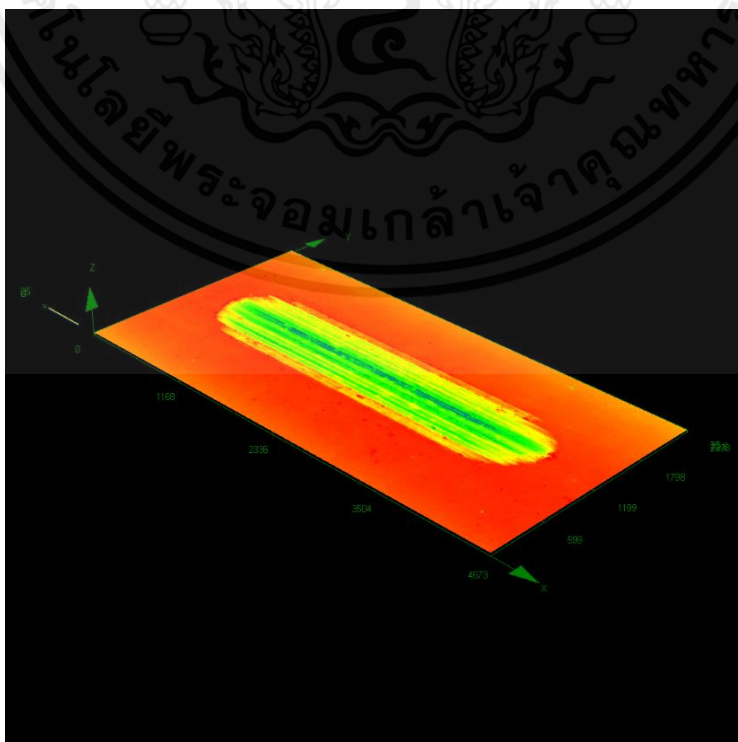
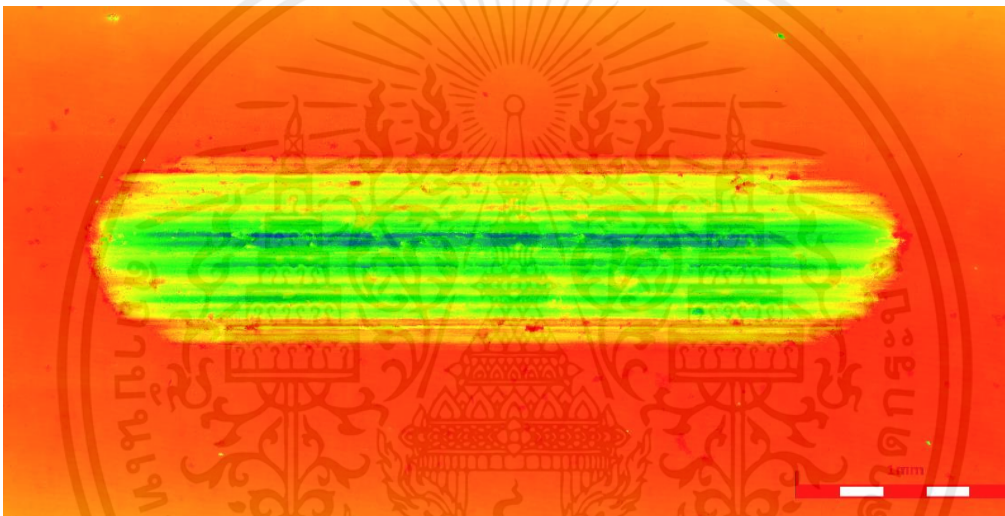
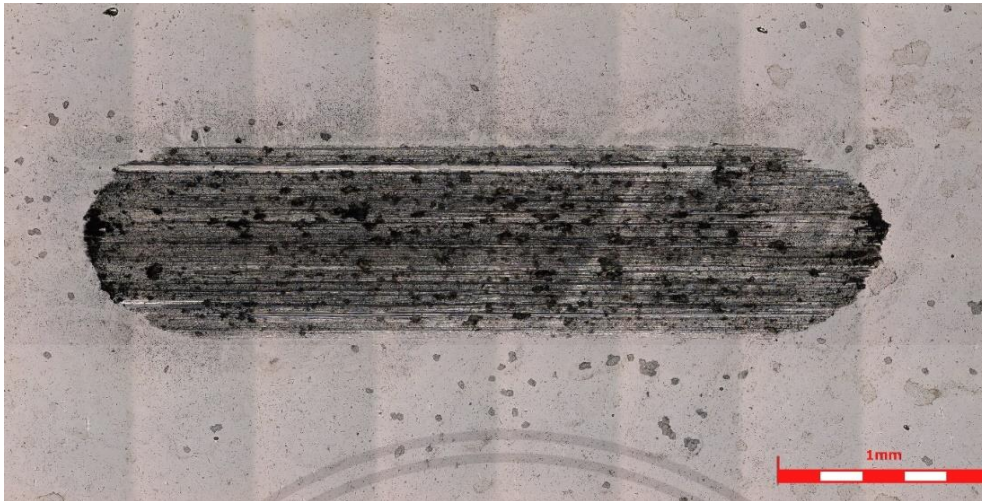
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลดิบจากการทำ Wear บน Ti-6Al-4V ด้วย Load 5 N



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

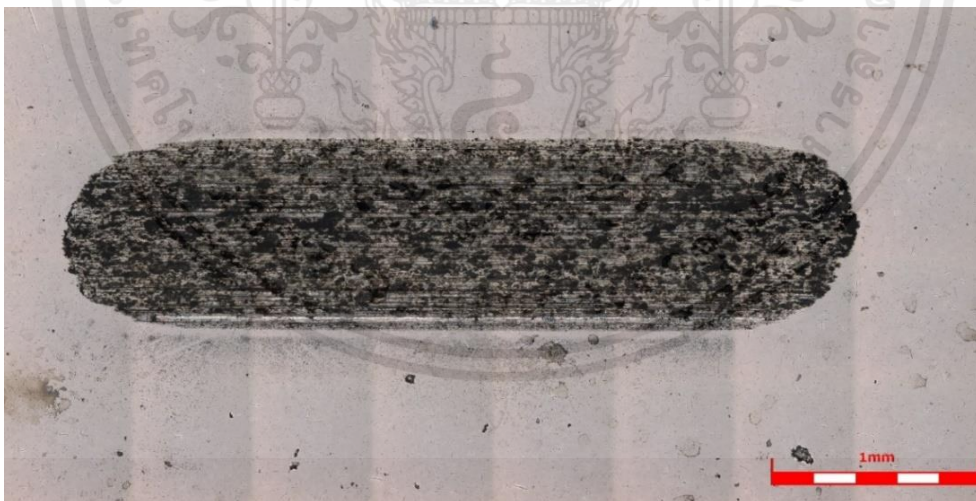
ข้อมูลดิบจากการทำ Wear บน Ti-6Al-4V + 0.5B ด้วย Load 5 N



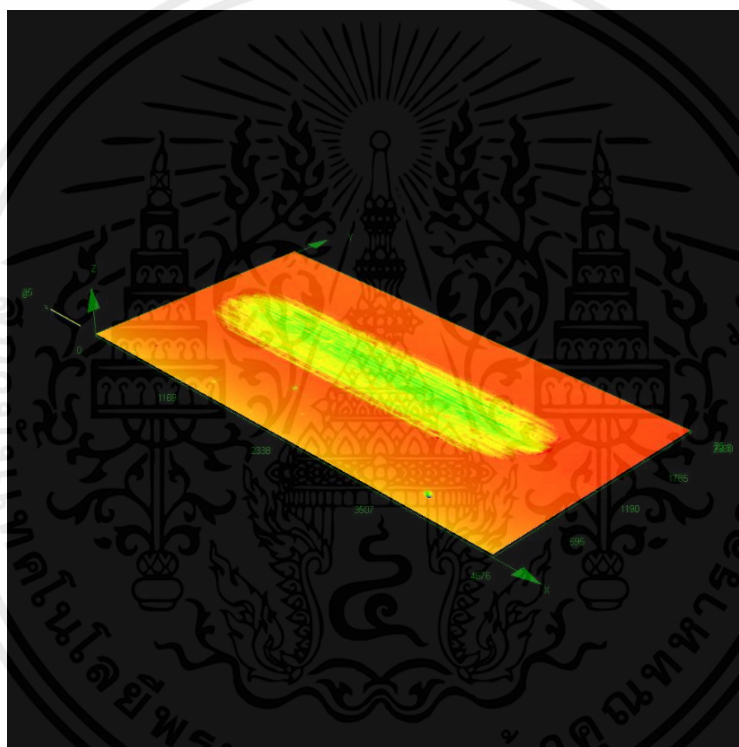
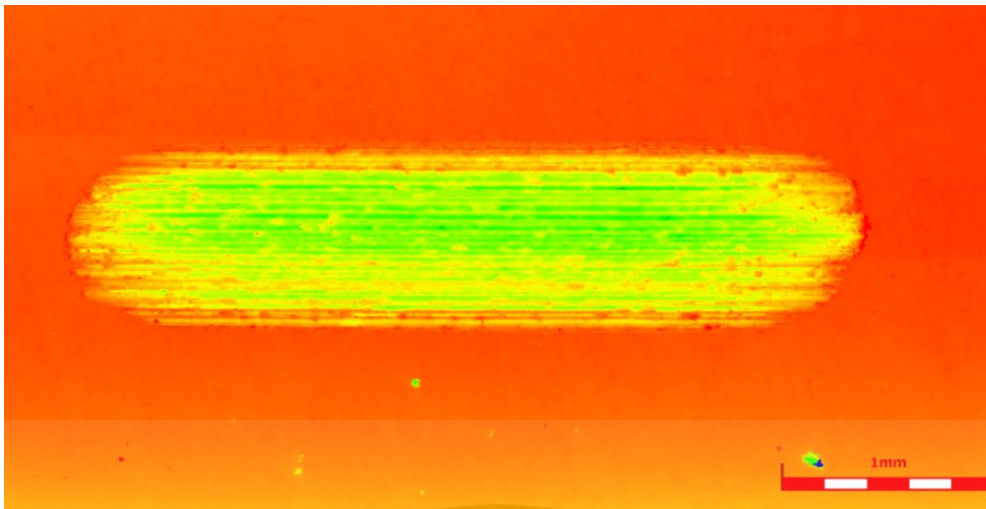
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No.	Result	Area [μm^2]	Surface area [μm^2]	Volume [μm^3]	S ratio	File name
1		6752457	7347155	21719383	1.088	20x_Ti64_0.5B_5N
			Surface			
		Area[μm^2]	area[μm^2]	Volume[μm^3]	S ratio	File name
Count		1	1	1	1	1
Average		6752457	7347155	21719383	1.088	0
Max.		6752457	7347155	21719383	1.088	0
Min.		6752457	7347155	21719383	1.088	0
Range		0	0	0	0	0
σ		0	0	0	0	0
3σ		0	0	0	0	0

ข้อมูลดิบจากการทำ Wear บน Ti-6Al-4V + 1.0B ด้วย Load 5 N



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



No.	Result	Area [μm^2]	Surface area [μm^2]	Volume[μm^3]	S ratio	File name
1		6250756	6618625	15903669	1.059	20x_Ti64_1.0B_5 N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	Area [μm^2]	Surface area [μm^2]	Volume [μm^3]	S ratio	File name
Count	1	1	1	1	1
Average	6250756	6618625	15903669	1.059	0
Max.	6250756	6618625	15903669	1.059	0
Min.	6250756	6618625	15903669	1.059	0
Range	0	0	0	0	0
σ	0	0	0	0	0
3σ	0	0	0	0	0

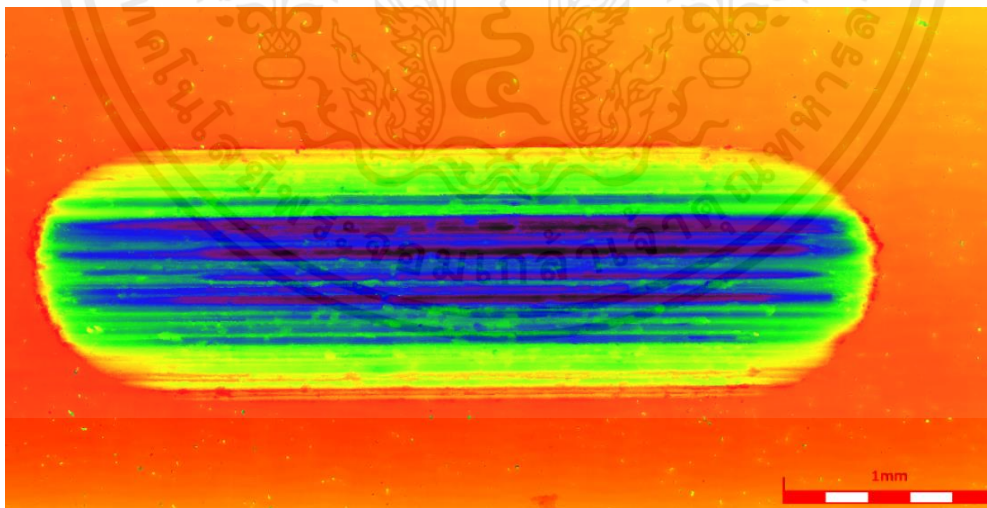
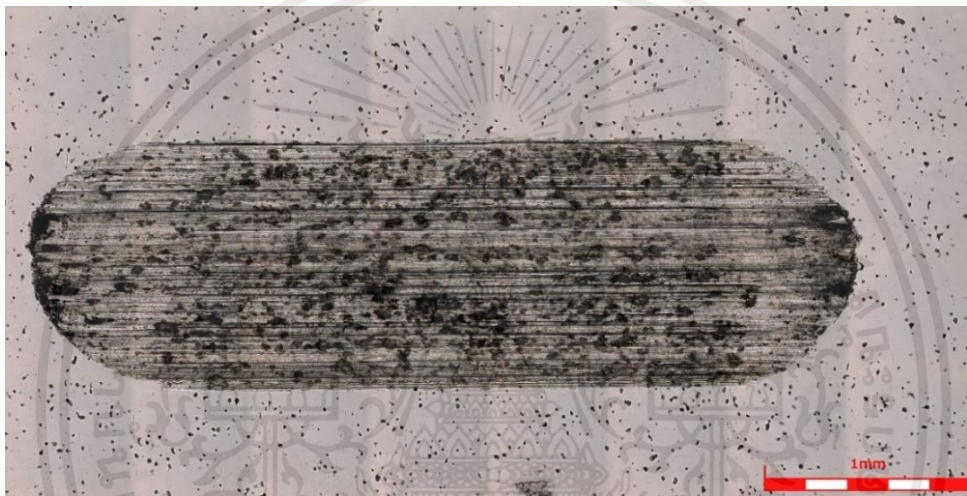
ข้อมูลดิบจากการทำ Wear บน Ti-6Al-4V + 1.5B ด้วย Load 5 N



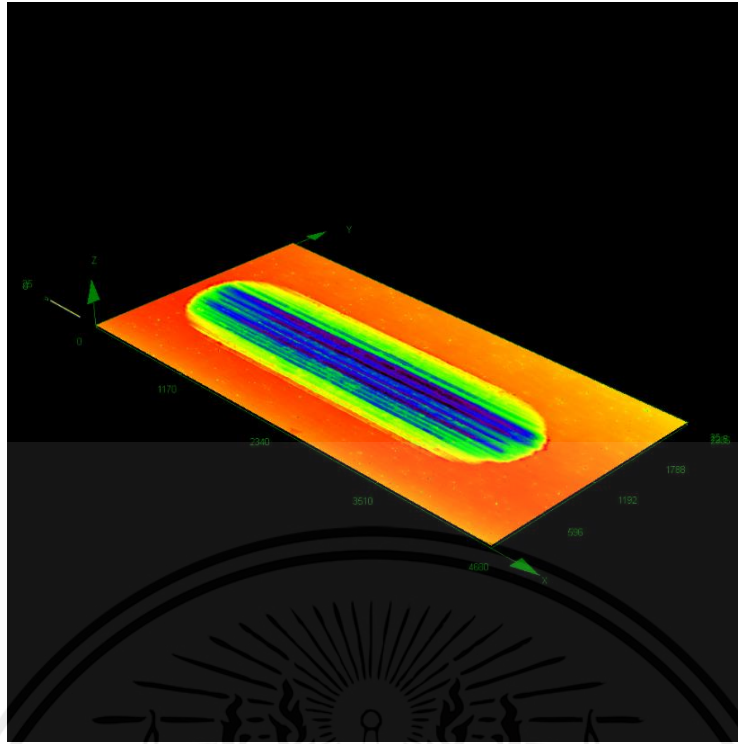
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load 5								
Condition	น้ำหนักก่อนทดลอง				น้ำหนักหลังทดลอง			
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
Ti-6Al-4V	1.0431	1.0429	1.043	1.043	1.0426	1.0428	1.0427	1.0427
Ti-6Al-4V + 0.5B	1.0986	1.0987	1.0989	1.0987333	1.0983	1.0982	1.0982	1.0982333
Ti-6Al-4V + 1.0B	0.9954	0.9957	0.9959	0.9956667	0.9954	0.9954	0.9955	0.9954333
Ti-6Al-4V + 1.5B	1.0405	1.0406	1.0406	1.0405667	1.0402	1.0404	1.0403	1.0403

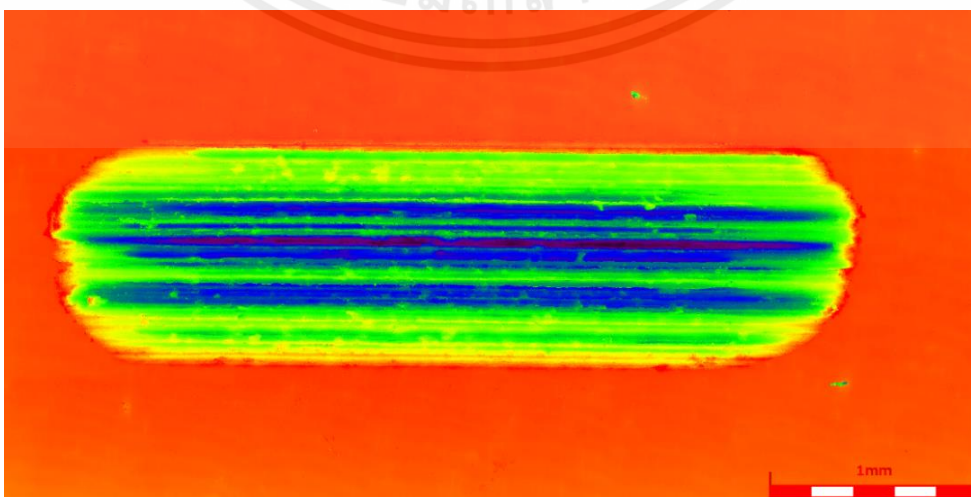
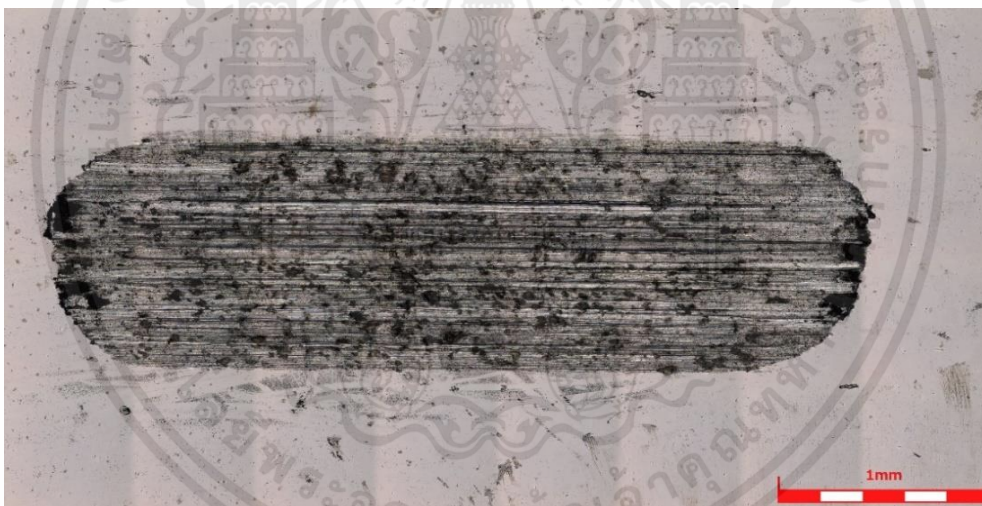
ข้อมูลดิบจากการทำ Wear บน Ti-6Al-4V ด้วย Load 10 N



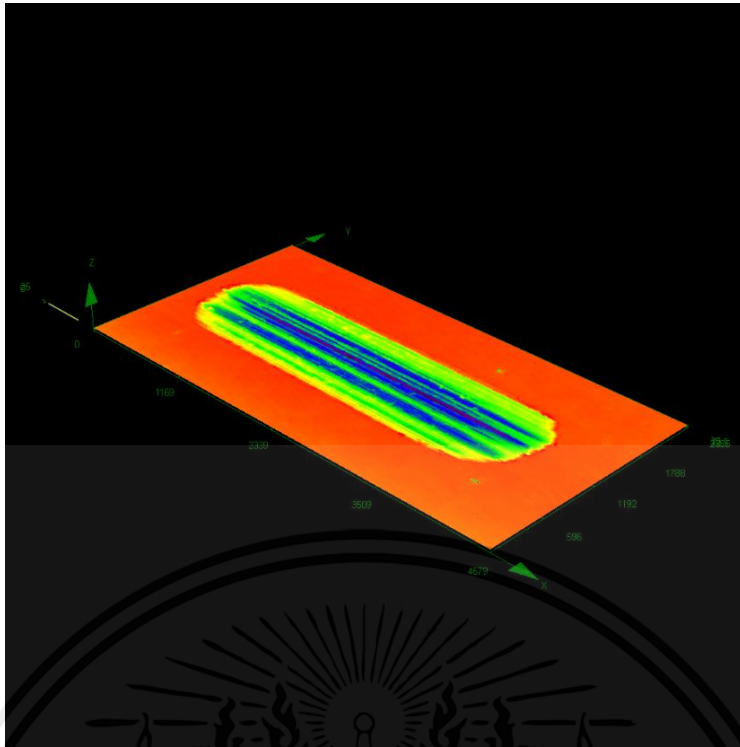
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข้อมูลดิบจากการทำ Wear บน Ti-6Al-4V + 0.5B ด้วย Load 10 N



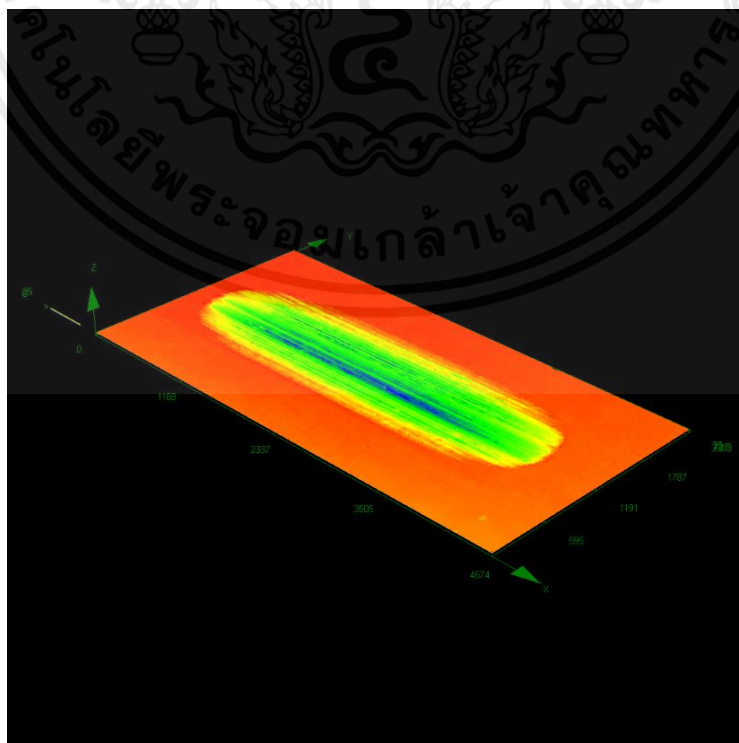
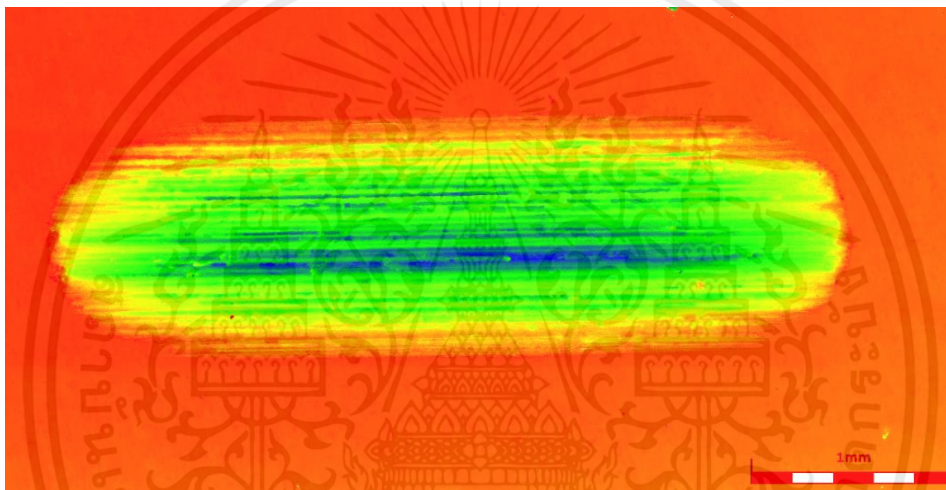
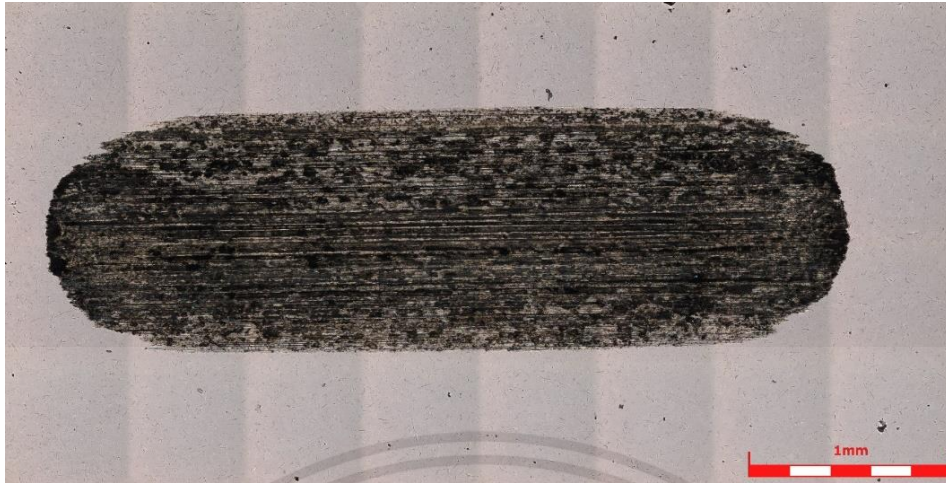
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



No.	Result	Surface Area [μm^2]	Surface area [μm^2]	Volume [μm^3]	S ratio	File name
1		6431095.615	7328362	40806133	1.14	20x_Ti64+0.5B_10N
		Surface Area [μm^2]	Surface area [μm^2]	Volume [μm^3]	S ratio	File name
Count		1	1	1	1	1
Average		6431095.615	7328362	40806133	1.14	0
Max.		6431095.615	7328362	40806133	1.14	0
Min.		6431095.615	7328362	40806133	1.14	0
Range		0	0	0	0	0
σ		0	0	0	0	0
3σ		0	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

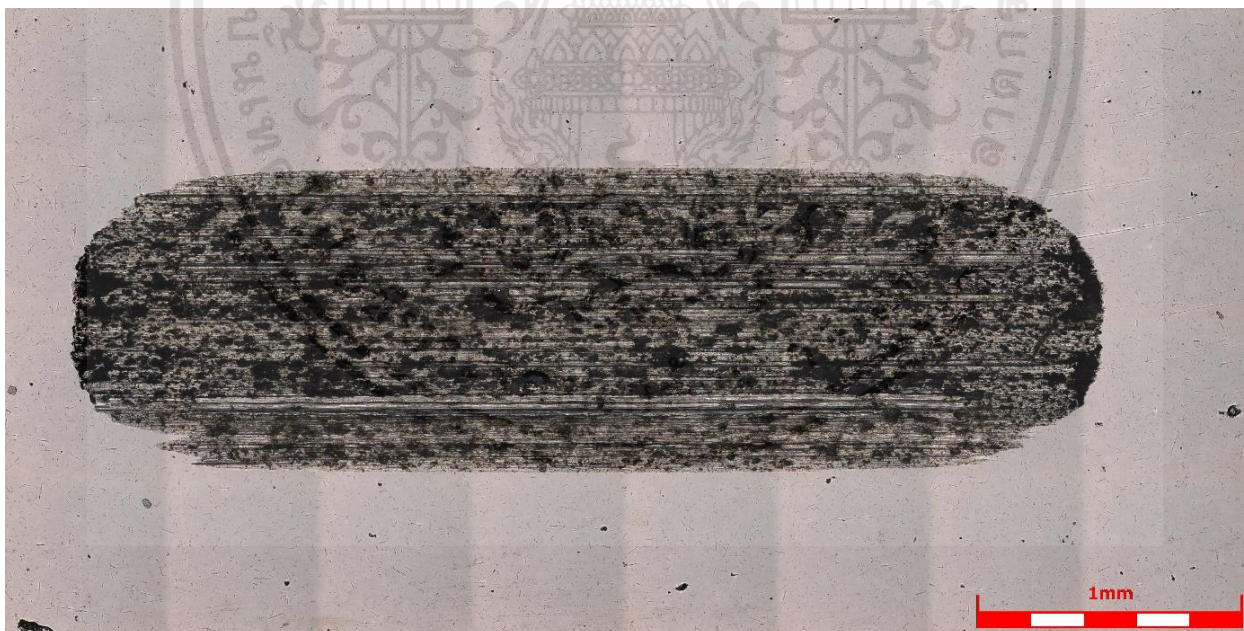
ข้อมูลดิบจากการทำ Wear บน Ti-6Al-4V + 1.0B ด้วย Load 10 N



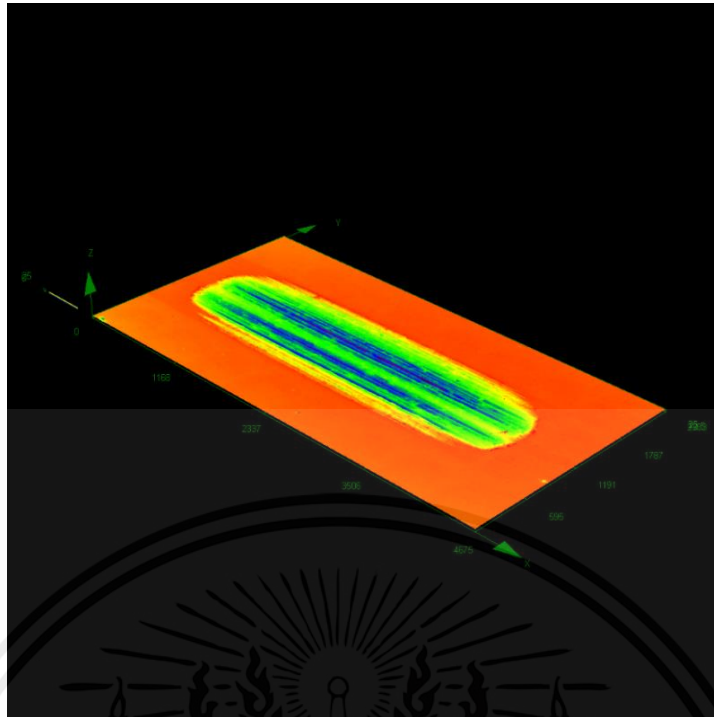
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No.	Result	Area [μm^2]	Surface area [μm^2]	Volume [μm^3]	S ratio	File name
1		7764600	8429758	31030748	1.086	20x_Ti64+1.0B_10N
Surface						
		Area[μm^2]	area [μm^2]	Volume[μm^3]	S ratio	File name
Count		1	1	1	1	1
Average		7764600	8429758	31030748	1.086	0
Max.		7764600	8429758	31030748	1.086	0
Min.		7764600	8429758	31030748	1.086	0
Range		0	0	0	0	0
σ		0	0	0	0	0
3σ		0	0	0	0	0

ข้อมูลดิบจากการทำ Wear บน Ti-6Al-4V + 1.5B ด้วย Load 10 N



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



No.	Result	Area [μm^2]	Surface area [μm^2]	Volume [μm^3]	S ratio	File name
1		8960812	9912321	37003964	1.106	20x_Ti64+1.5B_10
			Surface area	Volume		
		Area [μm^2]	[μm^2]	[μm^3]	S ratio	File name
Count		1	1	1	1	1
Average		8960812	9912321	37003964	1.106	0
Max.		8960812	9912321	37003964	1.106	0
Min.		8960812	9912321	37003964	1.106	0
Range		0	0	0	0	0
σ		0	0	0	0	0
3σ		0	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load 10								
Condition	น้ำหนักก่อนทดลอง				น้ำหนักหลังทดลอง			
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
Ti-6Al-4V	1.0513	1.0515	1.0516	1.0514667	1.0509	1.051	1.051	1.0509667
Ti-6Al-4V + 0.5B	1.0182	1.018	1.0184	1.0182	1.0179	1.0176	1.0179	1.0178
Ti-6Al-4V + 1.0B	1.0613	1.0613	1.0611	1.0612333	1.0609	1.0609	1.061	1.0609333
Ti-6Al-4V + 1.5B	1.0266	1.027	1.0264	1.0266667	1.0259	1.0263	1.0261	1.0261



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้