

พฤติกรรมการเสียรูปและสมบัติวัสดุของโลหะผสมไทเทเนียม
ภายใต้กระบวนการไฮเพรสเชอร์ทอร์ชัน

DEFORMATION BEHAVIOR AND MATERIAL PROPERTIES OF A TITANIUM
ALLOY UNDER HIGH-PRESSURE TORSION PROCESSING



ชนาเนตร ล้อมเรืองอนันต์
ญาณินท์ ยนจอหอ
ณิชชาพร กาญจนทวีลาภ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พฤติกรรมการเสียรูปและสมบัติวัสดุของโลหะผสมไทเทเนียม
ภายใต้กระบวนการไฮเพรสเชอร์ทอร์ชัน

DEFORMATION BEHAVIOR AND MATERIAL PROPERTIES OF A TITANIUM
ALLOY UNDER HIGH-PRESSURE TORSION PROCESSING




ชนาเนตร ล้อมเรืองอนันต์
ญาณินท์ ยนจอหอ
ณิชชาพร กาญจนทวีลาภ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEFORMATION BEHAVIOR AND MATERIAL PROPERTIES OF A TITANIUM
ALLOY UNDER HIGH-PRESSURE TORSION PROCESSING

The seal of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang is a circular emblem. It features a central sunburst with rays emanating from a central point. Below the sunburst are two traditional Thai stupas (chedis) flanking a central, more ornate structure. The entire emblem is surrounded by a circular border containing Thai text. The text at the top reads 'สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง' and the text at the bottom reads 'คณาจารย์และบุคลากร'.

CHANANATE LIMLENGANUN
YANIN YONCHORHOR
NICHAPORN KANJANATAVEELAP

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN RAIL TRANSPORTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2564

ภาควิชาเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมขนส่งทางราง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง พฤติกรรมการเสียรูปและสมบัติวัสดุของโลหะผสมไทเทเนียมภายใต้กระบวนการไฮเพรสเชอร์
ทอร์ชัน

Deformation Behavior and Material Properties of a Titanium Alloy under
High-Pressure Torsion Processing

ผู้จัดทำ

1. นางสาวชานาเนตร ลี้มเรืองอนันต์ รหัสประจำตัว 61010198
2. นางสาวญาณินท์ ยนจอหอ รหัสประจำตัว 61010257
3. นางสาวณิชชาพร กาญจนทวีลาภ รหัสประจำตัว 61010367

วิศกกร

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.จิตรารมณี วงศาางาม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พฤติกรรมการเสีรรูปและสมบัติวัสดุของโลหะผสมไทเทเนียมภายใต้กระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน

นางสาวชานาเนตร ลิ้มเรืองอนันต์ 61010198

นางสาวญาณินท์ ยนจอหอ 61010257

นางสาวณิชภาพร กาญจนทวีลาภ 61010367

ผศ.ดร.จิตรภรณ์ วงศางาม อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2564

บทคัดย่อ

การเลือกใช้งานวัสดุต้องมีการพิจารณาตามสมบัติวัสดุซึ่งสมบัติวัสดุถูกกำหนดโดยโครงสร้าง ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการผลิต ในการศึกษาที่ต้องการพัฒนาวัสดุเพื่อใช้เป็นทางเลือกให้กับ เทคโนโลยีที่กำลังพัฒนาภายใต้สมมติฐานที่ว่าสมบัติวัสดุสามารถปรับปรุงและพัฒนาได้โดยการทำให้ เป็นวัสดุเกรนละเอียดตามความสัมพันธ์ของ Hall-Petch จากการค้นคว้าพบว่าวัสดุเกรนละเอียด สามารถผลิตได้โดยกระบวนการที่เรียกว่าไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน และวัสดุที่ถูกนำมาใช้ในการศึกษานี้คือ โลหะผสมไทเทเนียม Ti-6Al-4V-ELI ซึ่งเป็นวัสดุทางการแพทย์ โดยการศึกษานี้แบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนที่ 1 ทำการศึกษาพฤติกรรมการเสีรรูปของวัสดุในระหว่างกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันโดย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Abaqus/Explicit ส่วนที่ 2 เป็นการทดสอบเพื่อพิจารณา ค่าสมบัติวัสดุหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน โดยวัดค่าความแข็ง และความต้านทานการกัดกร่อน ผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์พบว่าค่า Equivalent plastic strain ที่กระทำกับชิ้นงานจะแปร ผันตามจำนวนรอบการหมุน ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับแบจำลองที่คำนวณจากสมการ Equivalent Von Mises strain จากการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ ทอร์ชันพบว่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรอบการหมุนเพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกับค่า Equivalent plastic strain จากการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนพบว่าเมื่อจำนวนรอบการ หมุนเพิ่มขึ้น ความต้านทานการกัดกร่อนก็จะเพิ่มขึ้นด้วย และจากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) พบว่าเกรน ของวัสดุมีความละเอียดมากขึ้นหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน จึงสามารถสรุปได้ว่า กระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันมีศักยภาพในการเพิ่มสมบัติของวัสดุเนื่องจากความเค้นที่กระทำกับ ชิ้นงานทำให้เกรนมีความละเอียดมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEFORMATION BEHAVIOR AND MATERIAL PROPERTIES OF A TITANIUM ALLOY UNDER HIGH PRESSURE TORSION PROCESSING

Chananate	Limlenganun	61010198
Yanin	Yonchorhor	61010257
Nichaporn	Kanjanataveelap	61010367
Asst.Prof.Dr.Jittraporn	Wongsa-Ngam	Advisor
		Year 2021

Abstract

Material selections are considered according to material properties configured by the structure that resulted from manufacture. The aim of this project is to develop materials having better properties and meet industry requirements. The study is conducted based on the hypothesis of material properties can be improved by grain refinement related to the Hall-Petch relationship. The research found that fine-grain materials can be manufactured by the High-Pressure Torsion (HPT) process. In this study, an aluminum alloy is Ti-6Al-4V ELI selected, which is a biomedical material. The procedures are divided into two parts. In part 1 the deformation behavior of the material during the High-Pressure Torsion (HPT) process is investigated. Part 2 material properties are examined after the High-Pressure Torsion process by hardness measurement and corrosion resistance compared to the initial specimen. From computer simulation, after a high-pressure torsion process, the equivalent plastic strain increases along with the distance from the center and number of turns as Equivalent Von Mises strain theory. From examination, the hardness has increased trend to Equivalent plastic strain and the corrosion resistance has increased by the number of turns. For microstructure by Scanning electron microscope (SEM), the grains are more refined. The High-pressure torsion process has the potential to improve material properties due to strain leading to grain refinement.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะความอนุเคราะห์ ความเอาใจใส่ การแนะนำ และความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตรภรณ์ วงศางาม อาจารย์ที่ปรึกษา จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความรู้และเป็นที่ปรึกษาตลอดระยะเวลาที่ได้ทำวิทยานิพนธ์ และขอบพระคุณคณะกรรมการสอบปริญญาบัตร ที่ได้ให้คำแนะนำเพิ่มเติม และได้ช่วยให้ความรู้จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์

ขอขอบคุณพี่ ๆ ปริญญาโทที่ให้คำปรึกษา และคำแนะนำในการใช้โปรแกรม ABAQUS และยังคงหาแนวทางในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในการใช้โปรแกรม

ขอขอบคุณนางสาวพิมพ์ภาภรณ์ มั่นพิริยะกุล ที่คอยช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในเรื่องการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนและการใช้เครื่องมือต่าง ๆ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่สนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์ในการใช้โปรแกรม ABAQUS

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่สนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์ในการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.วันพุทธ แซ่ฉั่ว ที่สนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์ในการตัดชิ้นงานเพื่อนำไปใช้ในการทดสอบการกัดกร่อน

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา และมารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งเป็นผู้เลี้ยงดูและอบรมสั่งสอนข้าพเจ้ามาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสทางการศึกษาอย่างเต็มที่ รวมถึงคอยช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นางสาวชานาเนตร ลิ้มเรืองอนันต์

นางสาวญานินท์ ยนจอหอ

นางสาวณิชชาพร กาญจนทวีลาภ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทคัดย่อ.....	I
Abstract.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูปภาพ.....	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กระบวนการผลิตด้วยเทคนิคการทำให้เสียรูปอย่างรุนแรง.....	4
2.1.1 กระบวนการอิควิลแลนเนลแองกูลาร์เพรสซิ่ง.....	6
2.1.2 กระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน.....	6
2.2 สมบัติวัสดุ.....	9
2.2.1 ความแข็ง.....	9
2.2.2 การกัดกร่อน.....	12
2.3 ไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียม.....	23
2.3.1 การประยุกต์ใช้ไทเทเนียมในทางการแพทย์.....	25
2.3.2 วัสดุทางการแพทย์.....	26
2.4 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	28
2.4.1 บทนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 โปรแกรม Abaqus	28
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	35
3.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	37
3.1.1 การทดสอบแรงดึงเพื่อหาสมบัติของวัสดุ.....	37
3.1.2 การจำลองการเสีรูปทางคอมพิวเตอร์.....	39
3.2 การศึกษาสมบัติของวัสดุ	46
3.2.1 กระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีไฮเพรสเซอร์ชั่น.....	47
3.2.2 การทดสอบความแข็ง.....	48
3.2.3 การทดสอบการกัดกร่อน	50
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	60
4.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมการเสีรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	60
4.1.1 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานเพื่อหาสมบัติของวัสดุ.....	60
4.1.2 Material Model.....	62
4.1.3 ค่า equivalent plastic strain ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ HPT.....	62
4.2 ผลของการทดสอบความแข็งแบบจุลภาค	66
4.2.1 ค่าความแข็งแบบจุลภาคเฉลี่ยตามแนวรัศมี	66
4.2.2 การกระจายความแข็งระดับจุลภาคบนพื้นผิว.....	68
4.3 ผลของการทดสอบการกัดกร่อน.....	73
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	79
5.1 สรุปผลการวิจัย	79
5.2 ข้อเสนอแนะ	80
เอกสารอ้างอิง	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1	แสดงหลักการทำงานของ ECAP	6
รูปที่ 2.2	แสดงหลักการทำงานของ HPT	7
รูปที่ 2.3	แสดงหลักการทำงานของ HPT แบบ 3 ลักษณะ ได้แก่ (a) ไม่จำกัดการไหล, (b) จำกัดการไหล และ (c) กิ่งจำกัดการไหล.....	8
รูปที่ 2.4	แสดงตัวแปรที่ใช้ในการประมาณค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในกระบวนการ HPT.....	8
รูปที่ 2.5	แสดงหลักการวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ส	10
รูปที่ 2.6	ลักษณะการวัดศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเครื่องโพเทนชิโอสแตท	16
รูปที่ 2.7	ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน	17
รูปที่ 2.8	ส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญของเส้นโพลาริเซชัน	18
รูปที่ 2.9	วงจรที่ไม่ได้ต่อกันเป็นเส้นทางไฟฟ้าที่สมบูรณ์	20
รูปที่ 2.10	ลักษณะของกราฟการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรถัดเทียบเวลา	21
รูปที่ 2.11	ลักษณะของกราฟโพลาริเซชัน	23
รูปที่ 3.1	แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	36
รูปที่ 3.2	แสดงแบบชิ้นงานสำหรับใช้ทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM standards E8/E8M – 09	37
รูปที่ 3.3	แสดงเครื่องทดสอบแรงดึง รุ่น Shimadzu autograph AG-X	37
รูปที่ 3.4	แสดงขนาดแบบจำลอง	39
รูปที่ 3.5	แสดงตัวอย่างชิ้นงาน	40
รูปที่ 3.6	แสดงการแบ่งส่วนของชิ้นงาน.....	40
รูปที่ 3.7	แสดงตัวอย่าง anvil.....	40
รูปที่ 3.8	แสดงการประกอบชิ้นส่วน	41
รูปที่ 3.9	แสดงหน้าต่าง create step, Edit Step และ Mass scaling.....	42
รูปที่ 3.10	แสดงการสร้างสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับ anvil ด้านบน และ anvil ด้านล่าง	42
รูปที่ 3.11	แสดงหน้าต่าง create load.....	42
รูปที่ 3.12	แสดงการกำหนดโหลด	43
รูปที่ 3.13	แสดงหน้าต่าง create Boundary condition และ amplitude ของการกด	43
รูปที่ 3.14	แสดงหน้าต่าง create Boundary condition และ amplitude ของการหมุน	44
รูปที่ 3.15	แสดงหน้าต่าง Element Type และ mesh control ของชิ้นงาน	44
รูปที่ 3.16	แสดงหน้าต่าง Element Type และ mesh control ของ anvil	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.17 แสดงการเมชชิ้นงาน (ซ้าย) และ anvil (ขวา).....	45
รูปที่ 3.18 แสดงการสร้าง circular path.....	46
รูปที่ 3.19 แสดงการเก็บข้อมูล	46
รูปที่ 3.20 แสดง Circular path ที่ระยะทาง 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 และ 5.0 มิลลิเมตร จากจุดศูนย์กลางตามลำดับ	46
รูปที่ 3.21 แสดงการกลึงด้วยเครื่อง CNC.....	47
รูปที่ 3.22 แสดงการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทราย	47
รูปที่ 3.23 แสดงชิ้นงานทดสอบ.....	47
รูปที่ 3.24 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการ Mounting.....	48
รูปที่ 3.25 เครื่องวัดค่าความแข็ง Buehler TUKON 1102	49
รูปที่ 3.26 แสดงตำแหน่งที่วัดค่าความแข็งบนชิ้นงานตามแนวรัศมีจากบริเวณเส้นผ่านศูนย์กลาง ..	49
รูปที่ 3.27 แสดงตำแหน่งที่วัดค่าความแข็งบนชิ้นงานบริเวณควอดแดรนต์ที่ 1	50
รูปที่ 3.28 ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการไฮเพอร์ซเซอร์ทอร์ชัน.....	50
รูปที่ 3.29 เครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุนยี่ห้อ BUEHLER รุ่น METASERU250.....	51
รูปที่ 3.30 กล้องจุลทรรศน์สำหรับส่องดูผิวชิ้นงานเบื้องต้น	51
รูปที่ 3.31 ผ้าขัด diamond polishing paste.....	51
รูปที่ 3.32 ภาพระหว่างการขัด diamond polishing	52
รูปที่ 3.33 แสดงชุดเครื่องมือการทดสอบการกัดกร่อนยี่ห้อ AUTOLAB รุ่น PGSTAT 302N.....	52
รูปที่ 3.34 แสดงบริเวณที่ใส่โอรังเพื่อวางชิ้นงาน.....	53
รูปที่ 3.35 แสดงตัวอย่างการวางชิ้นงานทดสอบบนโอรัง	53
รูปที่ 3.36 แสดงชิ้นงานที่มีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของโอรัง	53
รูปที่ 3.37 แบบร่างของโอรังขนาดใหม่.....	54
รูปที่ 3.38 การชั่งตวงเกลือเคมี 35 กรัม เพื่อใช้เป็นสารละลายโซเดียมคลอไรด์	55
รูปที่ 3.39 Flat Cell Kit ที่ใส่สารละลายลงไป พร้อมกับหนีบขั้วเซลล์ไฟฟ้าและวางชิ้นงาน	55
รูปที่ 3.40 แสดงอุปกรณ์ที่พร้อมทำการทดสอบการกัดกร่อน	56
รูปที่ 3.41 แสดงการประเมินค่านอกช่วงทาเฟล หรือ Tafel slope	57
รูปที่ 3.42 แสดงค่าผลการทดสอบการกัดกร่อนที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล	57
รูปที่ 4.1 ชิ้นงานเมื่อผ่านการทดสอบการดึง	60
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดเชิงวิศวกรรม ของชิ้นงานที่ 1 (ซ้าย) และชิ้นงานที่ 2 (ขวา).....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจริง ของชิ้นงานที่ 1 (ซ้าย) และชิ้นงานที่ 2 (ขวา).....	61
รูปที่ 4.4 แสดงค่า Equivalent plastic stain บนชิ้นงาน Ti-6Al-4V ELI ที่สัมผัสกับ anvil ด้านล่าง.....	63
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Equivalent plastic strain กับระยะทางจากจุดศูนย์กลาง.....	64
รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Equivalent plastic strain กับจำนวนรอบการหมุน ที่ระยะทางจากจุดศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร.....	64
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Equivalent plastic strain เฉลี่ย บนพื้นผิวชิ้นงานกับจำนวนรอบการหมุน.....	65
รูปที่ 4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน ของ Equivalent plastic strain เฉลี่ย กับจำนวนรอบการหมุน.....	66
รูปที่ 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแบบจุลภาคเฉลี่ย (Microhardness) เทียบกับระยะทางจากบริเวณจุดศูนย์กลางชิ้นงาน ที่จำนวนรอบการหมุนที่ต่างกัน.....	67
รูปที่ 4.10 (a) ถึง (e) แสดงภาพคอนทัวร์ความแข็งแบบจุลภาคบริเวณควอดแรนต์ที่ 1 ที่จำนวนรอบการหมุนที่ต่างกัน.....	69
รูปที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแบบจุลภาคเฉลี่ยกับจำนวนรอบการหมุน	70
รูปที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันของค่าความแข็งแบบจุลภาคกับจำนวนรอบการหมุน.....	70
รูปที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแบบจุลภาคกับ Equivalent strain.....	72
รูปที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมธรรมชาติของค่าความแข็งแบบจุลภาคเฉลี่ย และลอการิทึมธรรมชาติของ Equivalent strain ของชิ้นงานหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ชัน	72
รูปที่ 4.15 เส้นโค้งโพลาริเซชันของชิ้นงานทดสอบในแต่ละเงื่อนไขในสารละลายโซเดียมคลอไรด์.	73
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานโพลาริเซชันกับจำนวนรอบการหมุน ...	75
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับจำนวนรอบการหมุน.....	75
รูปที่ 4.18 (a) ถึง (d) แสดงภาพถ่ายโครงสร้างพื้นผิวก่อนและหลังผ่านกระบวนการ ไฮเพรสเซอร์ชันที่ระดับ 20 ไมโครเมตร บริเวณขอบของชิ้นงาน	77

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	องค์ประกอบทางเคมีของโลหะผสม Ti-6Al-4V ELI [25]	25
ตารางที่ 2.2	คุณสมบัติทางกลของไทเทเนียมและโลหะผสมของไทเทเนียมแต่ละชนิด [26].....	25
ตารางที่ 2.3	แสดงความแตกต่างของเอลิเมินต์.....	29
ตารางที่ 3.1	แสดงคุณสมบัติของ Ti-4Al-6V ELI.....	41
ตารางที่ 3.2	แสดงองค์ประกอบทางเคมีของ Ti-6Al-4V ELI	46
ตารางที่ 3.3	แสดงเงื่อนไขการขึ้นรูปด้วยวิธีไฮเพรสเซอร์.....	48
ตารางที่ 4.1	สมบัติเชิงกลของวัสดุจากการทดสอบแรงดึง	61
ตารางที่ 4.2	แสดงผลของ Material Model.....	62



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การออกแบบอุปกรณ์หรือโครงสร้างทางวิศวกรรมที่มีวัตถุประสงค์ในการใช้งานที่ต่างกัน มีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับความต่อนั้น ๆ โดยสมบัติของวัสดุ (Material properties) เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางเคมี สมบัติทางความร้อน เป็นต้น สมบัติของวัสดุจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และองค์ประกอบ (Composition) ของวัสดุนั้น ๆ ซึ่งจะถูกกำหนดด้วยกระบวนการผลิต (Processing) ที่มีหลากหลายวิธี ทำให้วัสดุแต่ละชนิดจะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการเลือกวัสดุมาใช้จึงควรเลือกวัสดุที่มีสมบัติเหมาะสมที่สุด ซึ่งในปัจจุบันยังมีการศึกษาและพัฒนาสมบัติของวัสดุใหม่ ๆ เพื่อให้ได้วัสดุที่มีประสิทธิภาพในการใช้งาน และเหมาะสมกับการใช้งานมากที่สุด

โครงสร้างของวัสดุที่เป็นตัวควบคุมสมบัติของวัสดุ ซึ่งสามารถกำหนดได้จากกระบวนการผลิตที่นำเอาเทคโนโลยีด้านการผลิตมาใช้ในการพัฒนาวัสดุให้ได้สมบัติตามต้องการ ดังนั้นขนาดเกรน (Grain size) จึงเป็นหนึ่งตัวแปรสำคัญของโครงสร้างวัสดุซึ่งเป็นตัวกำหนดสมบัติของวัสดุ ดังความสัมพันธ์ของ Hall-Petch [1] ที่แสดงให้เห็นว่าเมื่อขนาดเกรนของโลหะเล็กลงจะส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงสูงขึ้น จึงทำให้การผลิตวัสดุเกรนละเอียดเป็นที่นิยมมากขึ้น โดยวัสดุเกรนละเอียด (Ultrafine-grained, UFG) สามารถผลิตได้ด้วยกระบวนการไฮเพรสเชอร์ทอร์ชัน (High Pressure Torsion, HPT) ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคนิคการทำให้เสียรูปร่างอย่างรุนแรง (Severe plastic deformation, SPD) ทำให้วัสดุมีความเครียดสูง เพื่อให้ได้ขนาดเกรนที่มีความละเอียดและขนาดของวัสดุไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก พร้อมสมบัติของวัสดุที่ดีกว่าวัสดุเกรนหยาบ (Coarse-grained materials) อย่างเห็นได้ชัด [2],[3] ในปัจจุบันกระบวนการไฮเพรสเชอร์ทอร์ชัน มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายและเป็นที่นิยมอย่างมาก

การออกแบบกระบวนการผลิตจำเป็นต้องเข้าใจถึงพฤติกรรมของการเสียรูปเป็นอย่างมาก เนื่องจากวัสดุเมื่อนำไปใช้งานจะมีสมบัติที่แตกต่างตามลักษณะการนำไปใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นสมบัติทางกลที่เกิดจากการได้รับแรงกระทำจากภายนอกหรือสมบัติทางเคมีที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมี เช่น การกัดกร่อน อุณหภูมิ เป็นต้น การศึกษาพฤติกรรมของวัสดุภายใต้สภาวะนั้น ๆ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อไม่ให้วัสดุเกิดความเสียหายขณะที่นำไปใช้งาน และยังสามารถนำวัสดุไปใช้งานได้ อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย การศึกษาพฤติกรรมของการเสียรูปของวัสดุ เช่น การเข้าใจถึงพฤติกรรม การเปลี่ยนแปลงความเครียดของวัสดุที่ผ่านกระบวนการทำให้เสียรูปร่างอย่างรุนแรงซึ่งถือเป็นเรื่องที่สำคัญมาก เนื่องจากค่าความเครียดที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานจะแปรผันโดยตรงกับค่าความต้านแรง ณ จุดคราก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Yield stress) และค่าความต้านแรง ณ จุดครากแปรผันโดยตรงกับค่าความแข็งแรงของวัสดุ ซึ่งสามารถจำลองการเสียรูปของวัสดุได้โดยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำให้สามารถดูแนวโน้มความแข็งแรงของวัสดุได้

ไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียม (Titanium and Titanium alloys) เป็นวัสดุที่มีความน่าสนใจอย่างมากในการนำมาใช้ในเชิงอุตสาหกรรมเนื่องจากสมบัติที่โดดเด่นของโลหะชนิดนี้ คือ มีความแข็งแรงต่อน้ำหนัก (Specific strength) มาก มีความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion resistance) ได้ดี เป็นวัสดุทนความร้อนสูง (Refractory materials) ดังนั้นไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมจึงถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลาย เช่น ด้านการบินและอวกาศ การทหาร ยานยนต์ หรืออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารเคมี นอกจากนี้ไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมยังมีสมบัติที่มีความเข้ากันได้กับร่างกายมนุษย์ (Biocompatibility) จึงมีความนิยมในการนำมาใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ (Biomaterial) อย่างแพร่หลาย เช่น การปลูกถ่ายข้อต่อเทียม ศัลยกรรมกระดูกเทียม รากฟันเทียม ฟันปลอม หรืออุปกรณ์การผ่าตัดพวกไบเมต กรรไกรผ่าตัด เป็นต้น ดังนั้นจึงมีงานวิจัยเพื่อพัฒนาสมบัติของโลหะกลุ่มนี้ให้สามารถใช้งานได้ตรงตามความต้องการของผู้ผลิตอย่างต่อเนื่อง วัสดุทางการแพทย์เป็นวัสดุที่ใช้กับร่างกาย รวมทั้งได้สัมผัสกับสารละลายที่มีออกซิเจนผสมอยู่ไม่ว่าจะเป็น น้ำ น้ำลาย หรืออากาศก็ตามซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้บริเวณผิวของวัสดุเกิดสนิม การสึกหรอ หรือเกิดการกัดกร่อนในรูปแบบที่แตกต่างกันตามสภาพแวดล้อม ทำให้เกิดงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาการกัดกร่อนอย่างแพร่หลาย ดังนั้นวัสดุทางการแพทย์จึงจำเป็นต้องพัฒนาสมบัติในด้านความแข็งแรงและความต้านทานการกัดกร่อนอย่างมาก เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานมากที่สุด

จากที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นถึงกระบวนการผลิตที่ทำให้เกิดวัสดุเกรนละเอียดซึ่งมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการนำไปผลิตวัสดุที่ใช้ในทางการแพทย์ จึงเป็นที่มาของการศึกษาโครงการวิจัยนี้ที่จะนำเทคโนโลยีการผลิตวัสดุเกรนละเอียดโดยวิธีการทำให้เสียรูปถาวรอย่างรุนแรงมาประยุกต์ใช้กับโลหะผสมไทเทเนียม ซึ่งก็คือ Ti-6Al-4V ELI เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุชนิดนี้ระหว่างกระบวนการไฮเพรสเซอร์ชันด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และเพื่อศึกษาสมบัติของวัสดุด้วยการทดสอบความแข็งแรงและความต้านทานการกัดกร่อน ทั้งก่อนและหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ชัน

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปของโลหะผสมไทเทเนียมระหว่างกระบวนการไฮเพรสเซอร์ชันโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
2. เพื่อศึกษาสมบัติวัสดุของโลหะผสมไทเทเนียมทั้งก่อนและหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 สมมติฐานการศึกษา

สมบัติของวัสดุสามารถพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นได้ด้วยกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน โดยจะทำให้วัสดุมีความแข็งแรง และความต้านทานการกัดกร่อนที่มากขึ้น เมื่อเทียบกับวัสดุก่อนกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปของโลหะผสมไทเทเนียมด้วยการจำลองโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผ่านโปรแกรม ABAQUS
2. ผลิตชิ้นงานทดสอบโดยใช้กระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน
3. ศึกษาสมบัติวัสดุโดยการวัดค่าความแข็งแรง และความต้านทานการกัดกร่อน ของ Ti-6Al-4V ELI Alloy หลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1.5.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1.5.2 ศึกษาวิธีการและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1.5.3 วางแผนการดำเนินการ

1.5.4 ดำเนินการศึกษา

1. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method)

2. การศึกษาสมบัติของวัสดุ

1.5.5 วิเคราะห์ผลการศึกษา

1.5.6 สรุปผลการวิจัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาพฤติกรรมการเสียรูป และสมบัติของวัสดุที่ผ่านกระบวนการผลิตด้วยเทคนิคการทำให้เสียรูปอย่างรุนแรง จำเป็นจะต้องมีความรู้พื้นฐานในเรื่องของเทคนิคการทำให้เสียรูปถาวรอย่างรุนแรง การทดสอบสมบัติและข้อมูลของวัสดุ การจำลองทางคอมพิวเตอร์ รวมถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งจะกล่าวในบทนี้

2.1 กระบวนการผลิตด้วยเทคนิคการทำให้เสียรูปอย่างรุนแรง

วัสดุเกรนละเอียด (Ultrafine-grained materials, UFG) เป็นวัสดุที่มีขนาดเกรนอยู่ในระดับไมครอน (Submicron structure; 100 nm ถึง 1000 nm) และระดับนาโน (Nano-structure; เล็กกว่า 100 nm) โดยเทคนิคการผลิตวัสดุเกรนละเอียดสามารถแบ่งเป็นสองวิธีหลัก ๆ คือ “Bottom-up” และ “Top-down” [4]

Bottom-up เป็นวิธีที่นำวัสดุอนุภาคเล็ก เช่น อนุภาคนาโน มาใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมและผลิตชิ้นงาน ตัวอย่างวิธีการผลิต เช่น วิธี High-energy ball milling และ Inert gas condensation เป็นต้น ซึ่งวิธีเหล่านี้สามารถผลิตวัสดุเกรนละเอียดที่มีขนาดเกรนเล็กมาก ๆ ได้ถึงระดับนาโน แต่อย่างไรก็ตามวิธี Bottom-up อาจทำให้ชิ้นงานเกิดการเจือปนของอนุภาคอื่น และเนื่องจากชิ้นงานมีขนาดเล็กอาจทำให้มีรูพรุนเกิดขึ้นในระหว่างการผลิต รวมทั้งมีข้อจำกัดในการนำไปประยุกต์

Top-down เป็นวิธีที่วัสดุเกรนหยาบจะถูกทำให้เป็นวัสดุเกรนละเอียดด้วยเทคนิคการทำให้เสียรูปอย่างรุนแรง ซึ่งเป็นแนวทางที่เพิ่มความเครียดให้กับวัสดุโดยการใส่แรงกระทำเพื่อให้วัสดุเกิดการเสียรูปถาวรเป็นผลให้โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุถูกเปลี่ยนแปลง โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดวัสดุอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากส่วนใหญ่เทคนิคนี้มีการใส่แรงที่ค่อนข้างสูงให้กับชิ้นงาน ทำให้วิธีนี้ถูกเรียกว่า Severe Plastic Deformation (SPD) และชิ้นงานที่ผลิตด้วยวิธี Top-down จะไม่ถูกเจือปนด้วยอนุภาคอื่นรวมทั้งไม่มีปัญหาเรื่องการเกิดรูพรุนเหมือนที่เกิดในวิธี Bottom-up

การเสียรูปถาวร (Plastic deformation) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการขึ้นรูปโลหะ (Metal forming) ซึ่งก็คือ Bulk deformation process ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้ชิ้นงานมีการเสียรูปและเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก ชิ้นงานเริ่มต้นมีลักษณะที่เรียกว่า Bulk ซึ่งมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำ หรือมีลักษณะเป็นก้อนซึ่งประกอบด้วยกระบวนการต่าง ๆ ได้แก่ การรีด (Rolling processes), การตีขึ้นรูป (Forging processes), การอัดขึ้นรูป (Extrusion processes) และการดึงขึ้นรูป (Wire drawing processes) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

and bar drawing) ซึ่งวิธีเหล่านี้เรียกว่า วิธี Conventional bulk deformation process โดยการขึ้นรูปด้วยวิธีเหล่านี้จะทำให้วัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของวัสดุทำให้ความหนาแน่นของดิสโลเคชันเพิ่มขึ้นและขนาดเกรนเฉลี่ยมีแนวโน้มที่ลดลง อย่างไรก็ตามวิธีนี้ไม่สามารถผลิตวัสดุเกรนละเอียดระดับไมครอนหรือนาโนเมตรได้ เนื่องจากขนาดของพื้นที่หน้าตัดของวัสดุที่เปลี่ยนไปในแต่ละรอบของการผลิตเป็นข้อจำกัดในการเพิ่มขนาดความเครียดในชิ้นงาน ทำให้มีการวิจัยและพัฒนาวิธีการผลิตที่จะสามารถผลิตวัสดุเกรนละเอียดระดับไมครอนหรือนาโนเมตรด้วยหลักการทำให้วัสดุเสียรูปแบบถาวรซึ่งจะแก้ไขปัญหาเรื่องขนาดความเครียดเนื่องจากขนาดหน้าตัดของชิ้นงานที่เปลี่ยนไปได้ โดยวิธีนี้คือการเสียรูปแบบอย่างรุนแรง (Severe plastic deformation, SPD)

Vinogradov และ Estrin [2] ได้ทำการสรุปเนื้อหาเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองและการคำนวณของกระบวนการเสียรูปแบบอย่างรุนแรง วิธีนี้มีข้อดีคือขนาดและรูปร่างของชิ้นงานไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ทำให้เกิด Hydrostatic pressure ส่งผลต่อโครงสร้างภายในของวัสดุ เกิดกลไกที่ทำให้ขนาดเกรนเล็กลง (Grain refinement) และเกิดเป็นวัสดุเกรนละเอียดขนาดระดับไมครอนและนาโนเมตร เทคนิคการทำให้เสียรูปแบบอย่างรุนแรงสามารถทำให้วัสดุเกรนละเอียดมีความแข็งแรงสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นไปตามสมการความสัมพันธ์ของ Hall-Petch [1] ดังสมการที่ 2.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเค้นครากเพิ่มขึ้นตามขนาดของเกรนที่ลดลง วัสดุจะมีความต้านแรง (Strength) ที่เพิ่มขึ้นด้วย

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (2.1)$$

เมื่อ σ_y คือ Yield stress, σ_0 คือ Original yield stress, k คือ ค่าคงที่ และ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดเกรน

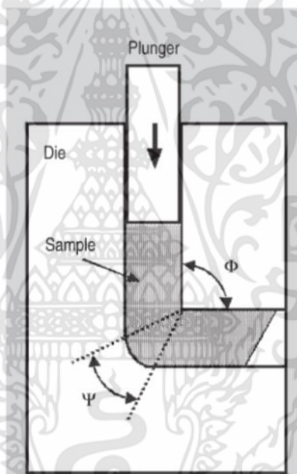
ปัจจุบันมีวิธีการผลิตด้วยเทคนิคการทำให้เสียรูปแบบอย่างรุนแรงจำนวนมากที่แตกต่างกัน แต่มีวิธีที่ถูกให้ความสนใจมากที่สุด 2 วิธี คือ วิธีอีควอลแชนเนลแองกูลาร์เพรสซิง (Equal-channel angular pressing, ECAP) และ วิธีไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน (High pressure torsion, HPT)

2.1.1 กระบวนการอิคवलแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซิ่ง

ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอิคवलแซนเนิลแองกูลาร์เพรสซิ่ง จะถูกกดด้วย Plunger ภายในแม่พิมพ์ (Die) ที่มีหน้าตัดคงที่และมีช่องที่ส่วนโค้งทำมุมซึ่งกันและกัน ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการนี้ขนาดหน้าตัดขวางของชิ้นงานจะไม่เปลี่ยนแปลง เพื่อให้สามารถกดชิ้นงานซ้ำได้หลายครั้งจนกระทั่งได้ระดับความเครียดตามที่ต้องการ โดยสามารถหาค่าของ Equivalent strain (ϵ) ที่ให้กับชิ้นงานในการผ่านแม่พิมพ์หนึ่งครั้งได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.2 [5]

$$\epsilon = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(2 \cot \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \csc \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \right) \quad (2.2)$$

เมื่อ Φ คือ มุมด้านในระหว่างสองส่วนของช่อง, Ψ คือ มุมของส่วนโค้งด้านนอกของช่อง



รูปที่ 2.1 แสดงหลักการทำงานของ ECAP [6]

2.1.2 กระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน

โดยทั่วไปกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน ชิ้นงานจะอยู่ในลักษณะแผ่นบางหรือในรูปของดิสก์ ซึ่งชิ้นงานจะถูกวางไว้ระหว่างแอนวิลทั้งสองด้าน ดังรูปที่ 2.2 จากนั้นให้แรงอัดจากไฮดรอลิกและแรงบิดจากการหมุนแอนวิลแก่ชิ้นงาน ทำให้วัสดุเกิดการเสียรูปแบบถาวรเป็นผลให้โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้เกิดชิ้นงานที่มีขนาดเกรนละเอียด

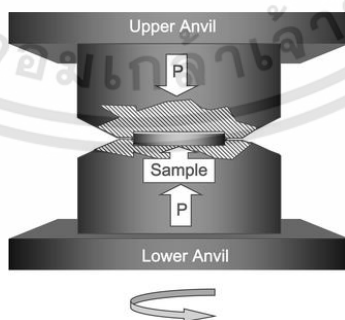
ในรูปที่ 2.2 เป็นหลักการของวิธีไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน เบื้องต้นเท่านั้น ในหลักการปฏิบัติจริงนั้นวิธีไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันสามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 ลักษณะ คือ ไม่จำกัดการไหล (Unconstrained), จำกัดการไหล (Constrained) และกึ่งจำกัดการไหล (Quasi-constrained) [7] ตามที่แสดงในรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

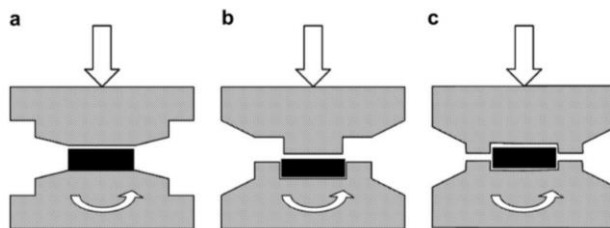
วิธีไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันแบบไม่จำกัดการไหล ดังที่แสดงในรูป 2.3(a) แอนวิลจะมีลักษณะแบน ไม่มีการขัดขวางการไหลของวัสดุ จึงทำให้การขยายตัวของสารไหลของวัสดุขึ้นอยู่กับความเสียดทานที่พื้นผิวของแอนวิลหรือชิ้นงาน และขนาดสัมพัทธ์ของชิ้นงาน โดยชิ้นงานจะถูวางอยู่ระหว่างแอนวิลราบทั้งสองอันในระหว่างการทดสอบ ข้อดีคือแอนวิลมีการออกแบบที่ง่ายแต่มีข้อเสียคือยากที่จะให้แรงดันตลอดทั้งตัวอย่างเมื่อให้แรงดันและหมุนชิ้นงาน เมื่อตัวแอนวิลไม่มีสิ่งกีดขวางการไหลออกของวัสดุที่ขอบเป็นผลทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานเพิ่มขึ้นขณะที่ตรงกลางเกิดแรงดันย้อนกลับเนื่องจากแรงเสียดทานที่มาก และทำให้ไม่เกิดการไหลออก จึงทำให้ความหนาเปลี่ยนแปลงตามรัศมีทำให้ชิ้นงานมีคุณสมบัติไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

ในวิธีไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันแบบจำกัดการไหล ดังที่แสดงในรูป 2.3(b) แอนวิลจะสร้างโดยมีท่อที่มีผนังหนารอบตัวอย่าง ซึ่งจะป้องกันการไหลออกด้านข้างทำให้ชิ้นงานยังคงรักษารูปร่างเดิมได้ทั้งหมด ในขณะที่ผ่านกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน ชิ้นงานจะอยู่ภายในแอนวิลที่ป้องกันการไหลอย่างสมบูรณ์ แรงดันคงที่ตลอดทั้งชิ้นงาน ทำให้มีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นหลังจากเสร็จกระบวนการ แต่มีข้อเสียคือการออกแบบโครงสร้างและการเลือกวัสดุที่เหมาะสมเป็นเรื่องที่ยาก เมื่อให้แรงกดทั้งชิ้นงานและแอนวิลจะมีความหนาลดลง เป็นผลทำให้แอนวิลจะเกิดการสัมผัส และนำไปสู่การมีแรงเสียดทานรวมถึงอัตราการสึกหรอที่พื้นผิวสัมผัสที่เพิ่มมากขึ้น

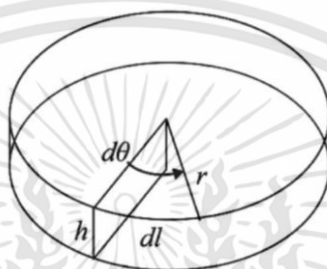
และวิธีไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันแบบกึ่งจำกัดการไหล ดังที่แสดงในรูป 2.3(c) แอนวิลแต่ละอันจะมีส่วนที่ถูกกดเข้าไปตรงกลางซึ่งจะเป็นที่จับชิ้นงานเอาไว้ในระหว่างกระบวนการ ผนังด้านข้างจะทำหน้าที่เป็นตัวขัดขวางการไหลของวัสดุ โดยจะอนุญาตให้เกิดเพียงริบิ้นบาง ๆ บริเวณเส้นรอบวงของชิ้นงานเท่านั้น อย่างไรก็ตามความหนาของตัวอย่างมีมากกว่าความลึกของส่วนที่ยุบลงไป ทำให้เกิดแรงเสียดทานมากที่ขอบ และมีการสึกหรอของแอนวิลต่ำ



รูปที่ 2.2 แสดงหลักการทำงานของ HPT [8]



รูปที่ 2.3 แสดงหลักการทำงานของ HPT แบบ 3 ลักษณะ ได้แก่ (a) ไม่จำกัดการไหล, (b) จำกัดการไหล และ (c) กิ่งจำกัดการไหล [9]



รูปที่ 2.4 แสดงตัวแปรที่ใช้ในการประมาณค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในกระบวนการ HPT [9]

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าการหมุนที่มุมเล็กๆ $d\theta$ และการกระจัด dl เมื่อ $dl = rd\theta$ โดยที่ r คือ รัศมีของชิ้นงานและความเครียดเฉือน γ ที่เกิดขึ้นถูกกำหนดโดยสมการที่ 2.3 [9]

$$\gamma = \frac{dl}{h} = \frac{rd\theta}{h} \quad (2.3)$$

เมื่อ h คือความหนาของชิ้นงาน โดยสมมติว่าความหนาของชิ้นงานไม่ขึ้นกับมุมของการหมุน เมื่อ $\theta = 2\pi N$ จะได้ค่าความเครียดเฉือนดังสมการที่ 2.4

$$\gamma = \frac{2\pi N \cdot r}{h} \quad (2.4)$$

เมื่อ N คือจำนวนรอบการหมุน และสามารถนำค่าความเครียดเฉือนไปหาค่า Equivalent strain ได้โดยใช้ Von Mises จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.5

$$\varepsilon = \frac{\gamma}{\sqrt{3}} \quad (2.5)$$

ทำการจัดรูปสมการใหม่จะได้ว่า

$$\varepsilon = \frac{2\pi Nr}{h\sqrt{3}} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สมบัติวัสดุ (Material properties)

สมบัติของวัสดุ คือ ลักษณะเฉพาะของวัสดุนั้น ๆ สมบัติทางกล (Mechanical Properties) เป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของวัสดุที่แสดงออกมาหลังจากมีแรงภายนอกมากระทำ เช่น ความแข็ง ความสามารถในการยืดตัว ความเหนียว เป็นต้น สมบัติทางเคมี (Chemical Properties) เป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวกับปฏิกิริยาทางเคมีของวัสดุ เช่น ความทนทานต่อการกัดกร่อน ความทนทานต่ออนุมูลอิสระ เป็นต้น สมบัติวัสดุที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ความแข็ง และการกัดกร่อน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อย่อย ดังต่อไปนี้

2.2.1 ความแข็ง [10][11]

ความแข็ง (Hardness) คือ ความต้านทานของวัสดุต่อการเสียรูปถาวร (Plastic deformation) เช่น การขีดข่วน การกด การตัด เป็นต้น ความแข็งไม่สามารถบ่งบอกด้วยหน่วยพื้นฐาน ของมวล ความยาว และเวลาของวัสดุได้ แต่ความแข็งคือผลจากกระบวนการทดสอบของความแข็ง ประเภทของการทดสอบความแข็งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ Scratch, Dynamic และ Indentation

การทดสอบความแข็งแบบ Scratch หรือการทดสอบความแข็งแบบ Moh's scale นิยมใช้วัดความแข็งของแร่ โดยวัสดุที่มีความแข็งมากกว่าจะสามารถขีดข่วนวัสดุที่มีความแข็งน้อยกว่าได้ โดยแบ่งช่วงของความแข็งเป็น 10 สเกลตามวัสดุอ้างอิงที่ใช้ในการทดสอบ แต่การทดสอบความแข็งนี้ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการทดสอบกับโลหะ เพราะมีช่วงของสเกลที่ค่อนข้างหายาก และการวัดจะไม่สามารถดูความกว้างและความลึกของรอยขีดข่วนที่เกิดจากวัสดุที่ใช้อ้างอิงภายใต้แรงกดคงที่ได้

การทดสอบความแข็งแบบ Dynamic หรือการทดสอบความแข็งแบบ Shore Scleroscope ถูกนำมาใช้ทางการค้าในการทดสอบความแข็งทางด้านโลหะกับวัสดุที่มีขนาดใหญ่ เช่น เหล็กที่ผ่านกระบวนการตีขึ้นรูป (Forging) หรือเหล็กที่ผ่านการรีดขึ้นรูป (Rolling) ทำการทดสอบโดยการปล่อยหัวกระแทกจากความสูงที่กำหนดให้ลงมากระทบกับผิวชิ้นงานแล้ววัดความสูงจากการกระดอนกลับของหัวกระแทก สเกลที่ใช้วัดจะถูกแบ่งเป็น 100 หน่วย โดยการใช้การกระดอนกลับของหัวกระแทกที่ทำจากเพชร

การทดสอบแบบ Indentation เป็นการทดสอบที่ใช้หัวกด (Indenter) กดลงไปบนชิ้นทดสอบที่ทำมุมทดสอบเป็น 90° ลงไปอย่างช้า ๆ แล้ววัดรอยกดที่เกิดขึ้น จากนั้นนำไปแปลงค่าเป็นความแข็ง การทดสอบแบบนี้สามารถบอกค่าความแข็งออกมาในเชิงตัวเลขตามวิธีการวัด ซึ่งวิธีที่นิยมใช้มีอยู่ 4 วิธี ได้แก่ การทดสอบความแข็งบริเนลล์ (Brinell Hardness Test), การทดสอบความแข็งร็อคเวลล์ (Rockwell Hardness Test), การทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส (Vickers Hardness

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Test) และการทดสอบความแข็งน็อพ (Knoop hardness test) ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส

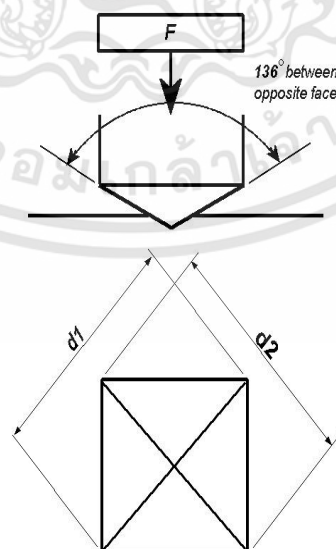
การทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test) มีลักษณะรูปทรงของ Indenter หรือ หัวกดทดสอบจากทรงกลมเป็นหัวกดรูปปริมาตรฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมยอดมีขนาด 136° ซึ่งทำจากเพชร การทดสอบวิธีนี้เหมาะสำหรับวัสดุที่มีลักษณะอ่อนไปจนถึงแข็งมาก โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกดแต่เปลี่ยนเฉพาะแรงกดเท่านั้น ซึ่งขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะที่ทดสอบ โดยไม่ต้องคำนึงถึงความหนาที่เป็นข้อจำกัดของชิ้นงานทดสอบเนื่องจากหัวกดเพชรมีขนาดเล็กมาก

วิธีการทดสอบความแข็งแบบประกอบด้วยการกดวัสดุทดสอบด้วยหัวกดเพชรรูปปริมาตรฐานสี่เหลี่ยม และมุม 136° ระหว่างผิวหน้าตรงกันข้ามภายใต้ภาระ 1 – 100 กิโลกรัมแรง ใช้ระยะเวลา 10 – 15 วินาที เส้นทแยง (d_1 และ d_2) ที่หลงเหลือบนผิวหน้าของวัสดุ ภายหลังจากนำภาระออกตั้งรูปที่ 2.5 จะถูกวัดโดยกล้องจุลทรรศน์ และคำนวณค่าเฉลี่ยของเส้นทแยง พื้นที่ผิวเอียงของรอยกดจะถูกคำนวณค่าความแข็งคำนวณจากผลหารภาระต่อพื้นที่สี่เหลี่ยมของรอยกดตั้งแสดงในสมการที่ 2.7 และแสดงเป็นค่าโดยประมาณในสมการที่ 2.8

$$HV = \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \quad (2.7)$$

หรือ

$$HV = 1.854 \frac{F}{d^2} \quad (2.8)$$



รูปที่ 2.5 แสดงหลักการวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ส [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการรายงานผลความแข็งวิกเกอร์สควรจะรายงานดังนี้ 800 HV 300 /10 หมายความว่า ความแข็งวิกเกอร์ 800 โดยใช้ภาระ 300 นิวตันเป็นระยะเวลา 10 วินาที การให้ภาระที่ต่างกันจะให้ค่าความแข็งที่เท่ากันบนวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งดีกว่าการเปลี่ยนสเกลด้วยวิธีทดสอบความแข็งแบบอื่น ข้อได้เปรียบของการทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส คือการอ่านค่าที่แม่นยำสูง และสามารถใช้หัวกดแบบเดียวกับทุกประเภทของวัสดุและการชุบแข็งผิว แม้ว่าความแม่นยำและการปรับเปลี่ยนได้สะดวกสำหรับการทดสอบวัสดุที่แข็งมากและอ่อนมากภายใต้ภาระที่เปลี่ยนแปลงได้ เครื่องทดสอบความแข็งวิกเกอร์สมีราคาแพงกว่าเครื่องทดสอบความแข็งบริเนลล์ และรีอคเวลล์

ความแข็งระดับจุลภาค (Microhardness) คือ ความแข็งที่วัดด้วยเครื่องมือที่มีหัวกด ขนาดเล็กภายใต้แรงกดไม่เกิน 1 กิโลกรัมแรง การทดสอบความแข็งระดับจุลภาค (Microhardness) จึงหมายถึงการทดสอบความแข็งแบบกด (Indentation) ภายใต้ภาระสถิตขนาด 1 กิโลกรัมแรงหรือน้อยกว่า เหมาะกับชิ้นงานขนาดเล็กบางหรือชิ้นงานที่ไม่ต้องการให้ปรากฏรอยกดขนาดใหญ่บนชิ้นทดสอบ วัสดุที่นิยมทดสอบความแข็งระดับจุลภาคนอกจากโลหะทั่วไป ยังมีโลหะแผ่นบาง, แผ่นพอยด์โลหะ (Metal foils), ลวด, แก้ว และเซรามิกส์ วัสดุที่กล่าวมานี้ เมื่อถูกรอยกดที่มากจะทำให้เกิดการแตก หรือเสียหาย จึงเหมาะที่จะนำมาทดสอบสร้างรอยขนาดเล็ก นอกจากจะสามารถทดสอบชิ้นงานที่บางแล้ว ยังสามารถทดสอบชิ้นงานที่มีพื้นผิวแข็งได้อีกด้วย การทดสอบแบบนี้นิยมนำมาใช้ในงานวิจัยในห้องปฏิบัติการ หรือในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม การทดสอบความแข็งระดับจุลภาคที่นิยมใช้กันจะมีสองชนิด ได้แก่ การทดสอบความแข็งจุลภาคแบบวิกเกอร์ส (Vickers microhardness testing) และการทดสอบความแข็งจุลภาคแบบน็อฟ (Knoop microhardness testing) การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์สและน็อฟเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E 92 สำหรับกรณีแรงกด 1-120 กิโลกรัมแรง และมาตรฐาน ASTM E 384 สำหรับ กรณีแรงกดต่ำกว่า 1 กิโลกรัมแรง

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งเทียบกับค่าความต้านแรงต่าง ๆ Ashby และ Jones และ Tabor ได้คิดค้นความสัมพันธ์โดยประมาณระหว่าง ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ส (H_v) เทียบกับค่าความต้านแรง ณ จุดคราก (Yield strength) ได้เป็นสมการที่ 2.9

$$H_v \approx 3 \times \sigma_y \quad (2.9)$$

ทั้งนี้ Ashby และ Jones และ Tabor ยังได้คิดค้นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้าน แรง ณ จุดคราก กับค่าความต้านแรงบิดที่จุดวิกฤติ (Critical shear fracture stress) โดยความสัมพันธ์นี้มีรากฐานมาจากเกณฑ์ของ Von Mises และเกณฑ์ของ Tresca ดังแสดง ในสมการที่ 2.10 และ 2.11 ตามลำดับ

$$2\tau_0 = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_y \approx 1.15\sigma_y \quad (2.10)$$

$$2\tau_0 = \sigma_y \quad (2.11)$$

โดยในเกณฑ์ของ Tresca ความเค้นตึงฉากจะไม่มีผลต่อความเค้นเฉือนบนระนาบของการเสีรูบ และเกณฑ์ของ Von Mises ผลของความเค้นตึงฉากต่อพฤติกรรมของการเสีรูบในการบิดไม่แปรผันต่อกันในวัสดุที่ต่างกัน อย่างไรก็ตาม Zhang et al. ได้สนับสนุนให้ใช้สมการนี้กับผลของความเค้นตึงฉากที่เกิดขึ้นต่อค่าความต้านแรงบิดที่จุดวิกฤติในแก้วโลหะ (Bulk metallic glass, BMG) แต่สมการนี้ก็ยังไม่เหมาะสมสำหรับทุกวัสดุ เช่น วัสดุที่เป็นผลึก (Crystalline materials), แก้วโลหะ, เซรามิก และอื่น ๆ อีกมากมาย

ในงานวิจัยตีพิมพ์อื่น ๆ ได้หยิบยกความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength, UTS) และค่าความแข็งซึ่งมีที่มาจากคู่มือ ASM ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในเรื่องของความแข็ง ดังแสดงในสมการที่ 2.12 ซึ่งเป็นสมการที่สามารถใช้เปรียบเทียบกับทุกวัสดุ และได้มีงานวิจัยยืนยันความถูกต้องของสมการนี้ไว้อย่างมากมายในปัจจุบัน

$$H_v \approx 3 \times \sigma_{UTS} \quad (2.12)$$

เมื่อ H_v คือค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ส และ σ_{UTS} คือค่าความต้านแรงดึงสูงสุดของวัสดุใด ๆ

2.2.2 การกัดกร่อน [12]

การกัดกร่อนเป็นภาวะซึ่งวัตถุหรือสิ่งประดิษฐ์ทางด้านวิศวกรรม ทำปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อมทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัตถุนั้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานหรือวัตถุประสงค์การใช้งานลดลงในสภาพแวดล้อมโดยทั่วไปสาเหตุการกัดกร่อนเกิดได้หลายอย่าง เช่น ปฏิกิริยาเคมี หรืออาจเกิดจากปฏิกิริยาทางกายภาพของวัตถุนั้นเอง การกัดกร่อนที่พบบ่อยมากที่สุดเป็นผลมาจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า การกัดกร่อนทั่วไปเกิดขึ้นเมื่ออะตอมส่วนใหญ่หรือทั้งหมดบนพื้นผิวโลหะเดียวกันถูกออกซิไดซ์ทำลายพื้นผิวทั้งหมด ซึ่งโลหะส่วนใหญ่ถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย โดยมักจะสูญเสียอิเล็กตรอนไปเป็นออกซิเจน และสารอื่น ๆ ที่มีในน้ำและอากาศ เมื่อออกซิเจนลดลง (รับอิเล็กตรอน) ก็จะเกิดออกไซด์กับโลหะ

โลหะบางชนิดมีความเฉื่อยต่อธรรมชาติหรือทนต่อการกัดกร่อน สิ่งนี้เกิดขึ้นเมื่อโลหะทำปฏิกิริยาหรือทำให้กร่อนกับออกซิเจนในอากาศ ผลที่ได้คือฟิล์มออกไซด์บาง ๆ ที่มาปิดกั้นหรือป้องกันแนวโน้มของโลหะที่จะเกิดปฏิกิริยาต่อไป ในทางตรงกันข้ามการป้องกันล้มเหลวหากฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียหายหรือถูกทำลายโดยความเครียดจากโครงสร้าง ดังนั้นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นสามารถป้องกันได้หลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น กระแสไฟฟ้าสามารถผลิตฟิล์มเฉื่อยแบบพาสซีฟบนโลหะที่ไม่ปกติได้ โลหะบางชนิดมีความเสถียรมากกว่าในสภาพแวดล้อมอื่น ๆ หรือโลหะบางชนิดสามารถรักษาด้วยเลเซอร์เพื่อให้มีโครงสร้างที่ไม่เป็นผลึก ซึ่งทนทานต่อการกัดกร่อน หรือได้รับการปกป้องโดยการชุบด้วยไฟฟ้า สารเคลือบ ที่สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้

2.2.2.1 ประเภทของการกัดกร่อน [13]

การกัดกร่อนที่พบบ่อยสามารถแบ่งออกได้เป็น 8 ประเภทหลัก ดังนี้

1) การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform corrosion)

เป็นประเภทที่พบบ่อยมากที่สุดและมีลักษณะเฉพาะโดยการเกิดไปทั่วพื้นผิวทั้งหมดของโลหะที่สัมผัสกับสารที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อน มักเกิดจากปฏิกิริยาเคมีหรือเคมีไฟฟ้าที่ทำให้โลหะถูกกัดในขณะที่เกิดออกไซด์ (Oxide) หรือสารประกอบอื่น ๆ ในบริเวณที่มองเห็นได้กว้าง ปฏิกิริยาเหล่านี้ทำให้โลหะสูญเสียความหนาเมื่อเวลาผ่านไปและสามารถดำเนินต่อไปได้จนกว่าโลหะจะกัดกร่อนจนหมด

2) การกัดกร่อนแบบไบเมทัลลิกหรือกัลวานิก (Bimetallic corrosion)

เกิดขึ้นเมื่อโลหะสองชนิดที่ไม่เหมือนกันแล้วสัมผัสกันโดยตรงหรือโดยอ้อม การกัดกร่อนประเภทนี้มีลักษณะเฉพาะเป็นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าล้วน ๆ ที่เกิดจากความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างโลหะทั้งสอง เมื่อสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) จะเกิดการก่อตัวเป็นเซลล์ชนิดหนึ่งซึ่งเรียกว่า Bimetallic couple โดยที่โลหะหนึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วบวกและอีกชนิดหนึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วลบ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากแอโนด (Anode) ไปยังแคโทด (Cathode) ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ที่แอโนด ทำให้เกิดการกัดกร่อน

3) การกัดกร่อนแบบรอยแยก (Crevice corrosion)

เป็นการแทรกซึมของการกัดกร่อนเฉพาะที่ซึ่งเกิดขึ้นในหรือติดกับช่องว่าง รอยแยก บนพื้นผิวของโลหะโดยตรง รอยแยกเหล่านี้อาจเป็นผลมาจากการเชื่อมต่อระหว่างพื้นผิวทั้งสอง (โลหะกับโลหะ หรือโลหะกับอโลหะ) หรือจากการสะสมของคราบสกปรก ลักษณะเฉพาะที่ว่าเป็นคือการเสื่อมสภาพในบริเวณรอยแยก ในขณะที่บริเวณโดยรอบของพื้นผิวยังไม่ได้รับผลกระทบ บทวิเคราะห์หนึ่งสำหรับการกัดกร่อนของรอยแยกคือการมีอยู่ของน้ำนิ่งภายในรอยแยก ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียออกซิเจนที่ละลายในน้ำและไอออนบวกจำนวนมากในรอยแยก นำไปสู่ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ของเหลวที่เป็นกรดในรอยแยกจะทำลายชั้นฟิล์มเฉื่อยของโลหะและทำให้เสี่ยงต่อการถูกกัดกร่อน

4) การกัดกร่อนแบบเป็นรูพรุน (Pitting corrosion)

การกัดกร่อนรูปแบบนี้แทรกซึมได้สูงและถือเป็นหนึ่งในประเภทการกัดกร่อนที่อันตรายที่สุด เนื่องจากการยากที่จะคาดการณ์และมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดความเสียหายอย่างกะทันหันและรุนแรง ลักษณะรูพรุนมักจะเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของโลหะ ซึ่งมีฟิล์มเฉื่อยป้องกันไม่สอดคล้องกันอยู่อาจเกิดความเสียหายของฟิล์ม การเคลือบไม่ดีหรือคราบแปลกปลอมบนผิวโลหะ ในที่ที่มีความชื้น แอโนดและแคโทดจะก่อตัวเป็นเซลล์การกัดกร่อนที่แอโนด (บริเวณที่ไม่มีฟิล์มเฉื่อย) เนื่องจากการกัดกร่อนจำกัดอยู่ที่บริเวณรูพรุน จึงมีแนวโน้มที่จะเจาะลงไปในความหนาของวัสดุ

5) การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular corrosion)

เป็นการสึกกร่อนแบบเร่งตามขอบเกรนของโลหะ ในขณะที่พื้นผิวโลหะส่วนใหญ่ยังคงปราศจากการสึกกร่อนอยู่ โลหะผสมบางชนิดเมื่อผ่านการอบชุบด้วยความร้อนที่ไม่เหมาะสม อาจมีสิ่งสกปรกแยกบริเวณขอบเกรน ซึ่งทำให้ทุบริเวณดังกล่าวได้ยาก ขอบเขตของเกรนตอนนี้แสดงถึงเส้นทางของความเสียหายต่อการกัดกร่อน

6) การผุกร่อนแบบเลือก (Selective Leaching or Dealloying)

ในสภาพแวดล้อมที่กัดกร่อนเฉพาะ โลหะผสมบางชนิดสามารถสัมผัสกับการกัดกร่อนได้ โดยที่องค์ประกอบหนึ่งของโลหะผสมเท่านั้นที่เสื่อมสภาพและถูกกำจัดออกโดยการกัดกร่อน

7) การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ (Erosion corrosion)

การเสื่อมสภาพแบบเร่งของโลหะซึ่งเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างของเหลวที่มีฤทธิ์กัดกร่อนกับพื้นผิวของโลหะ ในขณะที่ของเหลวไหลไปตามพื้นผิวด้วยความเร็วสูง ฟิล์มเฉื่อยออกไซด์ของโลหะอาจถูกกำจัดออกหรือละลาย ปล่อยให้โลหะผสมไวต่อความเสียหาย

8) การกัดกร่อนจากการแตกร้าว (Stress corrosion cracking, SCC)

การก่อตัวของรอยแตกขนาดเล็กบนพื้นที่เฉพาะบนผิวโลหะ การแตกร้าวนี้มักเกิดจากความเค้นดึงในสภาพแวดล้อมที่กัดกร่อนพร้อม ๆ กัน ถือเป็นรูปแบบการสึกกร่อนที่ร้ายกาจ เนื่องจากบางครั้งความเสียหายจะไม่ถูกตรวจพบในทันทีระหว่างตรวจสอบ และอาจส่งผลให้เกิดความล้มเหลวอย่างร้ายแรงและกะทันหันได้ ซึ่งการเชื่อม การอบชุบด้วยความร้อน และการแปรรูปด้วยความเย็นสามารถทำให้เกิดความเค้นตกค้างบนวัสดุที่สามารถเริ่มต้นได้

การกัดกร่อนมีอยู่หลายรูปแบบและสามารถเกิดขึ้นได้จากกลไกต่าง ๆ มีการกัดกร่อนประเภทอื่น ๆ อีกมากมายที่ไม่ได้กล่าวถึงในงานวิจัยนี้ ในทางการกัดกร่อน โลหะอาจสัมผัสกับสารละลายที่มีความเป็นกรด-เบสที่ต่างกัน อีกทั้งเราสามารถควบคุมศักย์ไฟฟ้าของโลหะให้มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่าง ๆ ได้ การที่โลหะอยู่ในรูปไอออนในสารละลาย หมายความว่า ในภาวะดังกล่าวโลหะเกิดการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอทั้งผิวหน้า (Uniform corrosion) ไปเป็นไอออนในสารละลาย การที่โลหะอยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ เป็นไปได้ว่าในภาวะดังกล่าว สารประกอบที่เกิดขึ้นนั้นจะยังคงเกาะติดและปกคลุมผิวโลหะอยู่ ออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ที่ปกคลุมผิวนี้สามารถทำหน้าที่เป็นฟิล์มช่วยชะลอการกัดกร่อนของโลหะเนื่องจากสารละลาย เราจะเรียกภาวะที่โลหะมีฟิล์มปกคลุมตัวมันและช่วยชะลอการกัดกร่อนลงได้ว่า ภาวะแพสซิฟ (Passivity)

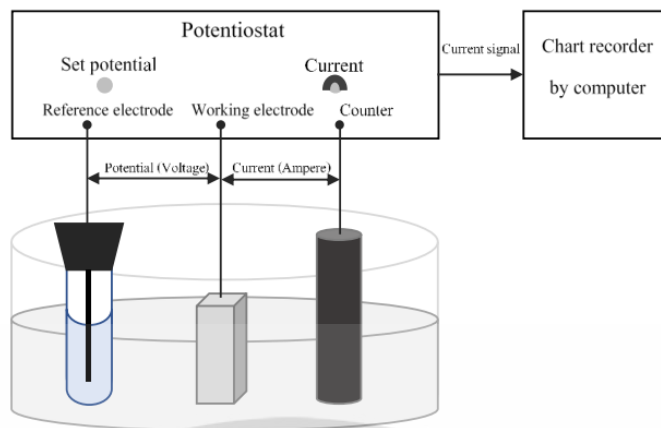
2.2.2.2 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยหลักการทางไฟฟ้าเคมีและการประมวลผล

[14]

การทดสอบการกัดกร่อนเป็นการวัดความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อน สามารถทำได้โดยใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat analyzer) ดังแสดงในรูปที่ 2.6

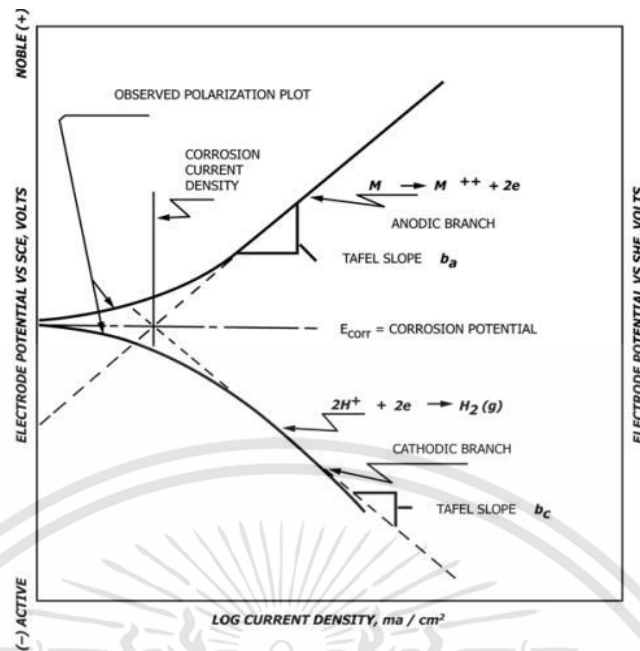
ในรูปที่ 2.6 แสดงเครื่องมือวัดศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโดยเครื่องโพเทนชิโอสแตท ประกอบด้วยเซลล์ขั้วไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรด 3 ชนิด เพื่อจัดเตรียมเซลล์ทดสอบการกัดกร่อน (Corrosion cell) แบบสามขั้วไฟฟ้า (Three electrode cell) ตามมาตรฐาน ASTM ได้แก่

- ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode, WE) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ปฏิกิริยาของสารที่ต้องการวิเคราะห์จะเกิดขึ้น โดยทั่วไปใช้วัสดุที่มีความเสถียรสูง ในการทดลองนี้เราจะใช้วัสดุที่ต้องการทดสอบ
- ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode, RE) เป็นขั้วไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์คงที่ และมีหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าเปรียบเทียบซึ่งทำให้รู้ความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าทำงาน โดยขั้วไฟฟ้าอ้างอิงนั้นมีหลายชนิด ซึ่งชนิดที่ห้องปฏิบัติการนั้นใช้ คือ ขั้วไฟฟ้าคาโลเมลแบบอิ่มตัว (Saturated Calomel Electrode, SCE) เป็นขั้วทุติยภูมิที่นิยมใช้ในการทดสอบทางเคมีไฟฟ้า เพื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของชิ้นงานทดสอบ โดย SCE มีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ เท่ากับ +0.24 V. เมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงไฮโดรเจนซึ่งเป็นขั้วปฐมภูมิ และภายในแท่งของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงจะมีสารละลายอิ่มตัวโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) อยู่ซึ่ง K^+ และ Cl^- ซึ่งมีขนาดไอออนใกล้เคียงกันมาก ทำให้การเคลื่อนที่ออกจากอิเล็กโทรดไม่เกิดความต่างศักย์ ดังนั้นค่าความต่างศักย์จึงมีค่าคงที่ตลอด
- ขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter Electrode, CE) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ช่วยทำให้ระบบไฟฟ้าครบวงจร วัสดุที่นิยมใช้มากที่สุดคือลวดแพลทินัม (Platinum)



รูปที่ 2.6 ลักษณะการวัดศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเครื่องโพเทนชิโอสแตท [14]

จากศักย์ไฟฟ้าเคมีและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ เมื่อนำมาสร้างกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองค่าจะได้กราฟที่เรียกว่า เส้นโค้งโพลาริเซชัน (Polarization curve) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 จากเส้นโพลาริเซชันสามารถหาค่าสำคัญที่มีความหมายตรงกับค่าการกัดกร่อน คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential, E_{corr}) และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density, i_{corr}) นอกจากนี้ยัง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของปฏิกิริยาแอโนดิกและปฏิกิริยาแคโทดิกบนพื้นผิวของโลหะที่กำลังถูกกัดกร่อน โดยปฏิกิริยาแอโนดิก (Anodic reaction) ที่เกิดขึ้นจะเรียกขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยา ดังกล่าวว่าแอโนด (Anode) และในทางการกัดกร่อนแอโนดคือโลหะที่ถูกกัดกร่อน ซึ่งปฏิกิริยาแอโนดิกก็คือปฏิกิริยาการกัดกร่อน เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าที่ผิว ความต่างศักย์ของขั้วทั้งสองเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังในเส้นโค้งแอโนดิก (Anodic curve) และเส้นโค้งแคโทดิก (Cathodic curve) ตามลำดับ โดยที่ความต่างศักย์ของแอโนดจะเปลี่ยนไปในทางบวก ส่วนความต่างศักย์ของแคโทดจะเปลี่ยนไปในทางลบ ในลักษณะเช่นนี้แสดงถึงการเกิดโพลาริเซชันของขั้วทั้งสอง สามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนได้จากจุดตัดของเส้นความชันของเส้นกราฟแอโนดและเส้นกราฟแคโทดดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน [15]

เมื่อทราบค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน จึงสามารถหาอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate, CR) ได้จากสมการ 2.13 [16]

$$CR = \frac{(3.27 \times 10^{-3}) \times EW \times i_{corr}}{\rho} \quad (2.13)$$

เมื่อ CR คือ อัตราการกัดกร่อน มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อปี (mm/yr)

i_{corr} คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน มีหน่วยเป็น ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

EW คือ น้ำหนักสมมูล (กรณีวัสดุไทเทเนียม มีค่าเป็น 27.925 g/mol)

ρ คือ ความหนาแน่น (กรณีวัสดุไทเทเนียม มีค่าเป็น 7.86 g/cm³)

เราจะเรียกสมการที่ 2.14 ว่ากฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลองกับอัตราการกัดกร่อน (ในหน่วยมิลลิเมตรต่อปี)

ในการคำนวณน้ำหนักที่เท่ากันของโลหะผสม อาจใช้วิธีการต่อไปนี้ พิจารณามวลต่อหน่วยของโลหะผสมที่ออกซิไดซ์ อิเล็กตรอนเทียบเท่ากับโลหะผสม 1 กรัม และจะได้สมการ Q ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

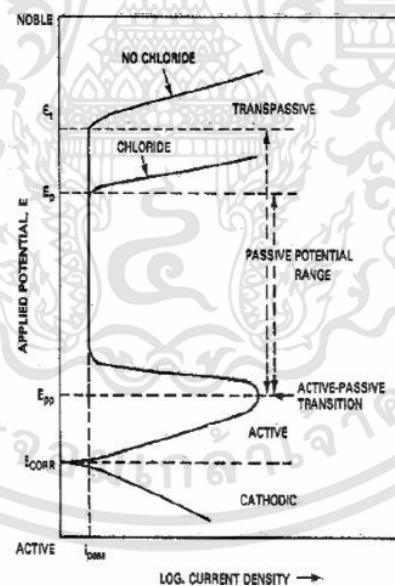
$$Q = \sum \frac{n_i f_i}{W_i} \quad (2.14)$$

เมื่อ f_i คือ สัดส่วนน้ำหนักของแต่ละธาตุในวัสดุ
 n_i คือ จำนวนเวเลนซ์อิเล็กตรอนของแต่ละธาตุในวัสดุ
 W_i คือ น้ำหนักอะตอมของแต่ละธาตุในวัสดุ

ดังนั้น น้ำหนักสมมูล (EW) ของโลหะผสม จึงเป็นส่วนกลับของประจุไฟฟ้า (Q) ดังสมการที่ 2.15

$$EW = \frac{1}{Q} = \frac{1}{\sum \frac{n_i f_i}{W_i}} \quad (2.15)$$

โดยปกติจะมีการคำนวณเฉพาะองค์ประกอบที่สูงกว่า 1 เปอร์เซ็นต์มวลในโลหะผสมเท่านั้น ในกรณีที่ไม่มีสารวิเคราะห์โลหะผสมที่แท้จริง เป็นเรื่องปกติที่จะใช้ช่วงกลางของข้อกำหนดองค์ประกอบสำหรับแต่ละองค์ประกอบ เว้นแต่จะมีพื้นฐานที่ดีกว่า



รูปที่ 2.8 ส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญของเส้นโพลาริเซชัน [17]

จากกราฟแสดงในรูปที่ 2.8 ทราบจุดตัดของเส้นกราฟแคโทดิกและเส้นกราฟแอโนดิก คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนหรือ E_{corr} ในแนวแกน Y และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนหรือ i_{corr} ในแนวแกน X เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าต่อไปจนถึงจุดหนึ่ง กระแสจะมีค่าลดลงเนื่องจากเกิดชั้นฟิล์มพาสซีฟบนผิวโลหะ เรียกค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดว่าเป็นจุดการเปลี่ยนแปลงแอคทีฟ-เอกซาร์นี้ เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พาสซีฟ (Active-Passive transition) และค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าพาสซีวชันปฐมภูมิ (Primarily passive potentials) ใช้สัญลักษณ์ E_{pp} เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าต่อไปค่ากระแสเริ่มลดลงจนคงที่ ณ ค่าหนึ่ง แม้จะเพิ่มศักย์ไฟฟ้าให้แก่เซลล์ต่อไปความหนาแน่นของกระแสก็ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง ช่วงกราฟที่แสดงนี้เรียกว่า ช่วงพาสซีฟ (Passive zone) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวที่แสดงถึงความทนทานของฟิล์มบนผิวโลหะ ถ้าเพิ่มศักย์ไฟฟ้าต่อไปอีกจนกระทั่งถึงค่าหนึ่งที่ทำให้ชั้นพาสซีฟเกิดการแตกหรือร้าวจะส่งผลให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เรียกช่วงที่เลยจุดนี้ว่า ช่วงทรานพาสซีฟ (Tran passive zone) และเรียกศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้ว่า ศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟ ใช้สัญลักษณ์ E_t ศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้เป็นค่าที่โลหะเริ่มกัดกร่อนเฉพาะที่ (Localized corrosion) คือการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม (Pitting corrosion) ซึ่งหากป้อนศักย์ไฟฟ้าเกินค่า E_t จะเกิดการแตกของชั้นฟิล์มพาสซีฟจุดใหม่เพิ่มขึ้นและชั้นฟิล์มจุดที่แตกเดิมจะมีการขยายตัวของรูเข็มหรือหลุมใหญ่ขึ้น

จากงานวิจัยที่ได้ศึกษา เมื่อเปรียบเทียบเส้นโพลาริเซชันที่ได้จากการทดลองของชิ้นงานตัวอย่างในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์และสารละลายที่มีคลอไรด์ พบว่าในสารละลายที่มีคลอไรด์จะให้ค่า E_t ต่ำกว่าหรืออีกนัยหนึ่ง เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting potential) ใช้สัญลักษณ์ E_p และมีความกว้างช่วงพาสซีฟแคบกว่าเส้นโพลาริเซชันที่ได้จากการทดลองในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ ตัวแปรที่มีผลต่อเส้นโพลาริเซชันได้แก่ ปริมาณออกซิเจนในสารละลาย อัตราการสแกน อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง ความเข้มข้นของสารละลายและอัตราการกวน กล่าวโดยทางอ้อมตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้มีผลต่อพลวัตการกัดกร่อนของตัวอย่างดังนั้นในการทดลองจึงจำเป็นต้องควบคุมตัวแปรดังกล่าว

นอกจากจะหาศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนจากจุดตัดของเส้นกราฟแคโทดิกและเส้นกราฟแอโนดิกแล้ว เส้นกราฟแคโทดิกและเส้นกราฟแอโนดิกยังแสดงค่าความชัน (Tafel slope, b_a และ b_c) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 จากนั้นนำค่า b_a และ b_c ไปคำนวณค่าความต้านทานโพลาริเซชัน (Polarization resistance, R_p) ตามที่แสดงในสมการที่ 2.16 ค่าความต้านทานโพลาริเซชันบ่งชี้ถึงความต้านทานการกัดกร่อนแบบทั่วไป (General corrosion) ของวัสดุได้เช่นเดียวกับค่า i_{corr} และ E_{corr}

การคำนวณค่าคงที่สเตอร์น-เกียร์ (Stern-Geary) จากเส้นความชันทาเฟล ซึ่งทั้งปฏิกิริยาแคโทดิกและแอโนดิกมีการควบคุมการกระตุ้น กล่าวคือ มีพื้นที่เชิงเส้นตรงที่ชัดเจนใกล้กับ ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนบนกราฟ E กับ $\log(i)$ ดังนี้

$$R_p = \frac{(b_a \times b_c)}{(2.303 \times (b_a + b_c) \times i_{corr})} \quad (2.16)$$

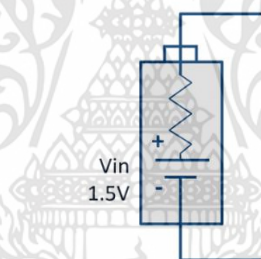
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ R_p คือ ค่าความต้านทานโพลาไรเซชัน มีหน่วยเป็น โอห์มตารางเซนติเมตร ($\Omega \cdot \text{m}^2$)
- b_a คือ ค่าความชันเส้นกราฟแอนอดิก Tafel slope โวลต์ต่อเดกเซต (V/decade)
- b_c คือ ค่าความชันเส้นกราฟแคโทดิก Tafel slope โวลต์ต่อเดกเซต (V/decade)
- i_{corr} คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน มีหน่วยเป็น แอมป์ต่อตารางเซนติเมตร (A/cm^2)

ในการทดสอบการกัดกร่อนด้วยหลักการทางไฟฟ้าเคมีและการประมวลผล สามารถแบ่งหัวข้อที่สำคัญและทฤษฎีออกได้เป็น 3 หัวข้อหลัก ดังต่อไปนี้

1.) การวัดศักย์ไฟฟ้าวงจรมืด [18] [19]

ศักย์ไฟฟ้าวงจรมืด หรือ Open-circuit potential (OCP) ถูกกำหนดให้เป็นศักย์ที่มีอยู่ในวงจรมืด กล่าวคือเป็นแรงดันไฟฟ้าเมื่อถอดขั้วปลายของวงจรมืดออกและไม่มีโหลดภายนอก แสดงภาพตัวอย่างในรูปที่ 2.10 รูปวงจรมืดไม่ได้ต่อกันเป็นเส้นทางไฟฟ้าที่สมบูรณ์



รูปที่ 2.9 วงจรมืดไม่ได้ต่อกันเป็นเส้นทางไฟฟ้าที่สมบูรณ์

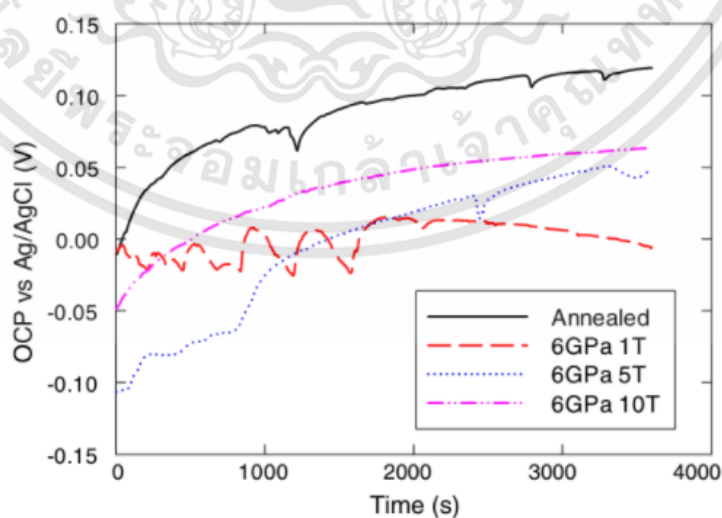
เมื่อศักย์ไฟฟ้าวงจรมืดทำให้ทำให้มีศักย์ภาพเต็มทีของแบตเตอรี่ แนวคิดในทางเดียวกันนี้สามารถนำไปใช้กับขั้วอิเล็กโทรดในวงจรมืดไฟฟ้าเคมีได้ โดยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าการทำงานจะวัดระหว่างอิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference Electrode) และอิเล็กโทรดทำงาน (Working Electrode) เมื่อจุ่มอิเล็กโทรดลงในอิเล็กโทรไลต์อิเล็กโทรดจะทำงานในรูปแบบของศักย์ไฟฟ้าวงจรมืด ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีทั่วไปโลหะสองชนิดที่ถูกแช่อยู่ในสารอิเล็กโทรไลต์จะทำให้ทั้งคู่มีศักย์ภาพในการทำปฏิกิริยาแบบวงจรมืด หากโวลต์มิเตอร์เชื่อมต่อกับอิเล็กโทรดทั้งสองจะสามารถวัดค่าความต่างศักย์ได้ แต่หากโลหะทั้งสองเชื่อมต่อกันด้วยไฟฟ้า เช่น ด้วยสายเคเบิล ความต่างศักย์ที่มีอยู่ระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองจะส่งผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหล ในขณะที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากโลหะที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำไปยังโลหะที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า โดยวัสดุที่มีศักย์ภาพต่ำจะกลายเป็นขั้วบวกและวัสดุที่มีศักย์ภาพสูงกว่าจะกลายเป็นขั้วลบ ความเข้าใจเกี่ยวกับศักย์ภาพของวงจรมืดมีความสำคัญอย่างยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในอุตสาหกรรมการกัดกร่อน เนื่องจากช่วยคาดการณ์ว่าวัสดุโลหะจะมีปฏิกิริยาการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าหรือไม่

ด้วยเหตุนี้ ศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดจึงน่าสนใจเป็นพิเศษด้วยเหตุที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล เพราะวงจรถูกเปิดอยู่ระหว่างโลหะสองชนิดในสารละลายเดียวกัน โดยศักย์ไฟฟ้าวงจรถูกเปิดจะใช้ค่าความต่างศักย์สูงสุดที่เป็นไปได้โดยไม่ต้องใช้ศักย์จากภายนอก ส่วนการใช้งานศักย์ไฟฟ้าวงจรถูกเปิด (OCP) และศักย์อื่น ๆ ส่วนใหญ่จะถูกรวบรวมเปรียบเทียบกับอิเล็กโทรดอ้างอิง เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าเป็นสารเติมแต่งจึงสามารถคำนวณทิศทางของค่าศักย์ไฟฟ้าได้ว่าจะเป็นอย่างใดเมื่อเทียบกับอิเล็กโทรดอ้างอิงอื่น ๆ ไม่มีทิศทางที่แน่นอน แต่นักไฟฟ้าเคมีเห็นตรงกันว่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของ Standard Hydrogen Electrode (SHE) กำหนดให้ใช้เป็นขั้วไฟฟ้ามาตรฐานมีศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเท่ากับ 0.00 โวลต์ เพื่อใช้เป็นครึ่งเซลล์มาตรฐานในการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าของครึ่งเซลล์ต่าง ๆ โดยครึ่งเซลล์มาตรฐานไฮโดรเจน จะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าซึ่งทำด้วยโลหะแพลทินัมฉาบผิวด้วยแพลทินัมแบล็กตลอดเวลา และจุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 mol/dm^3 ที่อุณหภูมิ $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ซึ่งง่ายต่อการระบุโลหะมีตระกูลที่ทนทานต่อการกัดกร่อนของกรด เนื่องจากการกัดกร่อนโปรตอนของกรดจำเป็นต้องลดไฮโดรเจนและเพื่อให้ศักย์ภาพที่เกิดขึ้นของโลหะต้องต่ำกว่า (แคโทดิกเพิ่มขึ้น) ศักย์ภาพของการลดโปรตอน

การวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรถูกเปิดเทียบกับเวลาเป็นการวัดศักย์ไฟฟ้าของโลหะที่เราสนใจเทียบกับอิเล็กโทรดอ้างอิง โดยไม่มีการป้อนศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าภายนอกให้แก่โลหะ และผลลัพธ์ที่ได้ออกมาเป็นกราฟศักย์ไฟฟ้าเทียบกับเวลา ดังรูปที่ 2.10



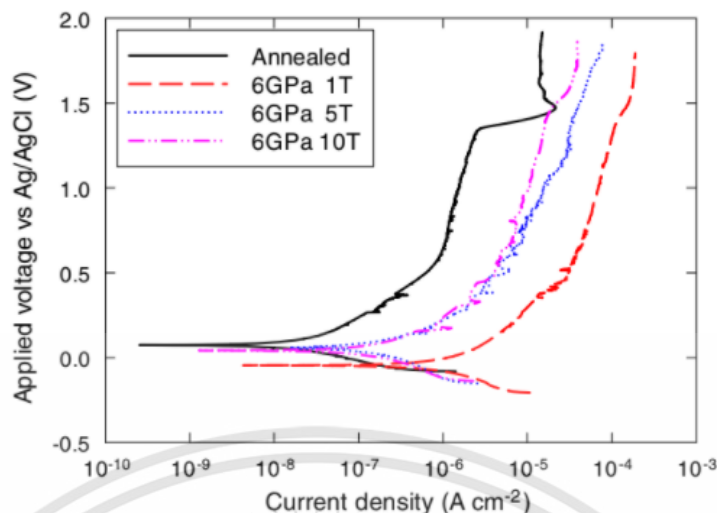
รูปที่ 2.10 ลักษณะของกราฟการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรถูกเปิดเทียบกับเวลา [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.) โพลเทนซิโอดีนามิกโพลาริซ์ [21]

โพลเทนซิโอดีนามิกเป็นคำที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้า (แรงดัน) ที่วัดได้ของระบบในเคมีไฟฟ้า คำนี้จะใช้เพื่ออธิบายวิธีการโพลาริซ์ในอุตสาหกรรมการกัดกร่อน ในขณะที่โพลเทนซิโอดีนามิก หมายถึง เทคนิคการโพลาไรเซชันซึ่งศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดจะแปรผันตามโดเมนศักย์ที่ค่อนข้างใหญ่ในอัตราที่เลือกโดยการใส่กระแสผ่านอิเล็กโทรไลต์ อีกทั้งโพลเทนซิโอดีนามิกโพลาริซ์มักใช้สำหรับการทดสอบการกัดกร่อนในห้องปฏิบัติการ ซึ่งสามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับกลไกการกัดกร่อน อัตราการกัดกร่อน และความอ่อนไหวของวัสดุเฉพาะต่อการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่กำหนดได้

เพื่อให้เกิดกระบวนการเคมีไฟฟ้าจำเป็นต้องมีขั้วบวก ขั้วลบ รวมทั้งไอออนิกและการนำไฟฟ้าของทั้งสอง เพื่อทำการแสกนโพลาริเซชันแบบกระแสตรง (DC Polarization scan) เส้นทางการนำไอออนิกให้ผ่านสารละลายที่แยกอิเล็กโทรดทำงานและอิเล็กโทรดช่วย ในขณะที่เส้นทางการนำไฟฟ้าให้ผ่านเครื่อง Potentiostat 302N ที่ใช้เพื่อควบคุมแรงขับเคลื่อนสำหรับปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นบนอิเล็กโทรดทำงาน ขนาดของแรงขับเคลื่อนนี้จะเป็นตัวกำหนดว่ากระบวนการเคมีไฟฟ้าใดเกิดขึ้นที่ขั้วบวกและขั้วลบตลอดจนอัตราอิเล็กตรอนไหลจากแอโนดไปยังแคโทดผ่านทางไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้แอโนดจึงถูกมองว่าเป็นขั้วลบส่วนแคโทดเป็นขั้วบวก ในการทดลองโพลเทนซิโอดีนามิก กระแสจะแสดงถึงอัตราที่เกิดปฏิกิริยาขั้วบวกหรือขั้วลบบนอิเล็กโทรดทำงาน โดยทั่วไปกระแสจะแสดงในรูปของกระแสต่อหน่วยพื้นที่ของอิเล็กโทรดทำงาน หรือความหนาแน่นกระแส ตัวแปรจำนวนมากจะส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ซึ่งรวมถึงอุณหภูมิ สภาพพื้นผิวของโลหะที่กำลังจะทดสอบ ตลอดจนสภาพแวดล้อมสารละลายทางเคมีที่ทำการทดลอง ควรสังเกตกระแสแคโทดและแอโนดในไดอะแกรมของอีแวนส์ (Evans diagram) ที่เป็นการพล็อตกราฟของ E เทียบกับ $\log(I)$ ด้วย โดยค่าสัมบูรณ์ของความหนาแน่นกระแสจะถูกพล็อต (กล่าวคือ กระแสถูกพล็อตเป็นค่าบวก) อย่างในรูปที่ 2.10 ตัวอย่างกราฟโพลาริเซชัน ตามแนวแกน Y คือค่า Potential, E (หน่วย Volt) และแนวแกน X คือ Current density, $\log(I)$ (หน่วย $A \cdot cm^{-2}$)



รูปที่ 2.11 ลักษณะของกราฟโพลาริเซชัน [20]

3.) การประมาณค่านอกช่วงจากทาเฟลในโปรแกรม NOVA [22]

เมื่อเราได้เส้นโพลาริเซชันจากการทดลอง เราจึงอาจหาเส้นทาเฟลแอโนดิกและเส้นทาเฟลแคโทดิกได้จากการลากเส้นตรงสัมผัสกราฟในช่วงศักย์เบี่ยงเบนไปทางแอโนดิกและแคโทดิกมาก ๆ จากนั้นจึงลากเส้นทั้งสองดังกล่าวต่อออกมาให้ตัดกัน ค่าในแกนตั้งของจุดตัดระหว่างเส้นทาเฟลแอโนดิกและเส้นทาเฟลแคโทดิกคือศักย์การกัดกร่อน ส่วนค่าในแกนนอนของจุดตัดระหว่างเส้นแอโนดิกและแคโทดิกคือขนาดความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน เมื่อทราบค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน เราสามารถหาค่าอัตราการกัดกร่อนต่อไปได้โดยใช้กฎของฟาราเดย์ เราจะเรียกวิธีการหาความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนแบบนี้ว่า การประมาณค่านอกช่วงจากเส้นทาเฟล (Tafel extrapolation)

2.3 ไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียม

โลหะไทเทเนียมสามารถเกิดปฏิกิริยากับธาตุอื่น ๆ ได้ง่าย จึงไม่พบในรูปโลหะบริสุทธิ์ตามธรรมชาติ แต่จะพบในรูปสารประกอบในแร่ชนิดอื่น ๆ ที่พบบ่อยคือแร่รูไทล์ (Rutile : TiO_2) และแร่อิลเมนิต์ (Ilmenite : $TiFeO_3$) ไทเทเนียมเป็นโลหะที่มีความแข็งแรงสูง แต่น้ำหนักค่อนข้างเบา (มวลอะตอม คือ 47.88 g/mol) และมีความหนาแน่นต่ำ 4.506 g/cm^3 การนำไฟฟ้าของไทเทเนียมไม่มากนักซึ่งทำได้เพียง 3.1% เมื่อเทียบกับการนำไฟฟ้าของทองแดง จึงเหมาะแก่งานทางด้านอากาศยานและงานที่ต้องการประสิทธิภาพสูง นอกจากนี้ไทเทเนียมยังถูกนำไปใช้ประโยชน์ในงานที่ต้องการความทนต่อการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมทางเคมีได้ดี สามารถการสร้างแผ่นฟิล์มป้องกันตัวเอง

โดยเฉพาะเมื่อสัมผัสกับกรดแร่และสารละลายที่มีคลอไรด์ผสมอยู่ ในทางชีวภาพไทเทเนียมสามารถเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้ากันได้กับเนื้อเยื่อและกระดูกของคน ซึ่งมีความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยม ประกอบกับความแข็งแรง ทำให้ไทเทเนียมถูกใช้งานในด้านเคมีหรืองานด้านปิโตรเคมี และงานไบโอแมททีเรียล (Biomaterial)

ในปัจจุบันมีการจำแนกประเภทของไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมได้หลายแบบ เช่น

- แบ่งตามโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมได้เป็น α -titanium และ β -titanium
- แบ่งประเภทของโลหะผสมไทเทเนียมตามผลของโลหะที่ใส่เพิ่มเข้าไปว่าส่งผลให้โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมเกิดการเปลี่ยนแปลงและมีความเสถียรในทิศทางใด แบ่งได้เป็น โลหะผสมชนิดอัลฟา โลหะผสมชนิดเบต้า โลหะผสมชนิดอัลฟา-เบต้า (α - β) และบางย่อยอีกเป็น โลหะผสมชนิด near- α และ โลหะผสมชนิด metastable- β

ตามตารางที่ 2.1 ได้รวบรวมสมบัติเชิงกลและประโยชน์ของโลหะผสม Titanium นอกจากนี้ ASTM international ของสหรัฐอเมริกา ได้แบ่งเกรดไทเทเนียมตามแนวทางที่ใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะได้มากกว่า 30 ชนิด โดยไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมที่นิยมนำมาใช้ในทางการแพทย์คือ ไทเทเนียมเกรด 5 (Ti-6Al-4V) และเกรด 23 (Ti-6Al-4V ELI) โดย Ti-6Al-4V ELI เป็นรุ่นความบริสุทธิ์สูงของ Ti-6Al-4V (เกรด 5) เป็นทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับความจำเป็นที่ต้องมีการรวมกันของความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา ความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี และความเหนียวสูง ในตารางที่ 2.2 ได้รวบรวมคุณสมบัติทางกลของไทเทเนียมและโลหะผสมของไทเทเนียมแต่ละชนิดเอาไว้ เพื่อทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของแต่ละชนิด

โลหะผสมไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V ELI เหมาะกับงานประเภทอุปกรณ์ทางการแพทย์ ที่ใช้ในร่างกายมนุษย์ เช่น รากฟันเทียม ไปจนถึงข้อต่อยึดกระดูกต่าง ๆ โดย ELI ถูกย่อมาจาก “Extra Low Interstitials” เป็นการทำให้ความแข็งแรงและความเหนียวสูงขึ้นรวมถึงความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้น และ Ti-6Al-4V ELI เป็นโลหะผสมที่ทำจากอลูมิเนียม 6% และวานาเดียม 4% เป็นไทเทเนียมที่ใช้กันทั่วไปในทางการแพทย์ เนื่องจากปัจจัยที่กลมกลืนกับร่างกายมนุษย์โลหะผสมไทเทเนียมเหล่านี้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการทางการแพทย์ มีความแข็งแรงจำเพาะสูง ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี และความเข้ากันได้ทางชีวภาพที่ดีเยี่ยม ทำให้ไทเทเนียมและโลหะผสมของไทเทเนียมเป็นวัสดุในอุดมคติสำหรับการปลูกถ่ายโลหะทางชีวการแพทย์ เนื่องจากมีการผสมผสานที่ยอดเยี่ยมของความแข็งแรง ความเหนียวต่อการแตกหัก และความต้านทานการกัดกร่อน เพราะเหตุนี้จึงทำให้ Ti-6Al-4V ELI นิยมใช้ในทางการแพทย์จำนวนมาก

2.3.1 การประยุกต์ใช้ไทเทเนียมในทางการแพทย์ [23] [24]

การนำวัสดุไทเทเนียมมาประยุกต์ใช้กับร่างกายมนุษย์นั้นควรมีคุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญเลยคือ ต้องมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ มีความต้านทานการกัดกร่อนของการฝังตัวในสารละลายร่างกายและน้ำหนักเบา ซึ่งไทเทเนียมกับเยื่อผิวของมนุษย์นั้นมีความสัมพันธ์ที่ดีต่อกัน มีความเข้ากันได้เพื่อปรับปรุงคุณภาพผิวของวัสดุฝังที่ติดอยู่ภายในและกระดูกมนุษย์จะมีประสิทธิภาพมากขึ้นในชั้น Bioceramic บนพื้นผิวที่ขรุขระ ปัจจุบันการใช้วัสดุโลหะผสมไทเทเนียม Ti-6Al-4V ELI หรือไทเทเนียมอัลลอยด์ชนิดอื่น ๆ มีการใช้อย่างแพร่หลาย เช่น ข้อต่อกระดูกเทียม รากฟันเทียม และวาล์วหัวใจเทียม เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของโลหะผสม Ti-6Al-4V ELI [25]

TITANIUM Grade 23 Ti - 6Al - 4V ELI (Extra low interstitials)											
The data given is for information not for design											
Chemical composition (weight %) (Maximum values unless range is shown)											
O	N	C	H	Fe	Al	V	Ni	Mo	Others	Residuals	
0.13	0.03	0.08	0.0125	0.25	5.5-6.5	3.5-4.5					0.4

An alpha-beta alloy based on Grade 5. The amount of interstitial elements (O, N, C) is reduced. Improved stress corrosion cracking (SCC) properties in seawater compared to Grade 5. Especially suited for thick wall highly stressed parts.

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกลของไทเทเนียมและโลหะผสมของไทเทเนียมแต่ละชนิด [26]

Materials	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	σ_{UTS} [MPa]	E [GPa]	ϵ_{max} [%]
α -type	-	-	-	-
CP-Ti grade 1	170	240	105	24
CP-Ti grade 2	275	345	105	2.20
CP-Ti grade 3	380	445	105	18
CP-Ti grade 4	480	550	105	15
$(\alpha + \beta)$ -type	-	-	-	-
T-6Al-4V (annealed)	825-869	895-930	110-114	6-10
T-6Al-4V ELI (mil annealed)	795-875	960-965	101-110	10-15
T-6Al-4V	795	860	105	10
T-6Al-4V	820	900	110	6
T-6Al-4V	585	690	100	15
β -type	-	-	-	-
Ti-13Nb-13Zr (aged)	836-908	973-1037	79-84	42-44
Ti-12Mo-6Zr-2Fe (annealed)	1000-1060	1060-1100	74-85	18-22
Ti-15Mo (annealed)	544	874	78	21
Ti-15Mo-5Zr-3Al (annealed)	838	852	80	25
Ti-15Mo-5Zr-3Al (ST)	1000-1060	1060-1100	-	18-22
Ti-15Mo-2.8Nb-0.25Si-0.260 (annealed)	945-987	979-999	83	16-18
Ti-16Nb-10Hf	736	851	81	10
Ti-35.5Nb-7.3-Zr-5.7-Ta	793	827	55-66	20
Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr (aged)	864	911	80	13.2
Ti-24Nb-4Zr-8Sn (Hot rolled)	700	830	46	15.0
Ti-24Nb-4Zr-8Sn (hot forged)	570	755	55	13.0
Ti-9Mn	1023	1048	94	19.0
Ti-6Mn-4Mo	1090	1105	89	15.0
Ti-10Fe-10Ta-4Zr	960	1092	-	6.0
Ti-12Cr	-	760	65	18.5
Ti-36Nb-2Ta-3Zr-0.3O	670-1150	835-1180	32	6.5-12.9
Ti-24Nb-0.5O	665	810	54	22
Ti-24Nb-0.5N	665	665	43	13
Ti23Nb-0.7Ta-2Zr	280	400	55	33
Ti-23Nb-0.7Ta-2Zr-1.2O	830	880	60	14

$\sigma_{0.2}$, σ_{UTS} , and E, ϵ_{max} are yield strength, ultimate tensile strength, elastic modulus, and ultimate strain. ST = solution treated.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 วัสดุทางการแพทย์ [27]

วัสดุทางการแพทย์สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายลักษณะ ทั้งการนำตัววัสดุนั้นไปใช้ประโยชน์ในการทำหน้าที่ต่าง ๆ โดยตรง และการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตอุปกรณ์ทางการแพทย์ โดยวัสดุบางประเภทอาจนำไปใช้งานเป็นระยะเวลาสั้น บางประเภทอาจใช้งานได้เพียงระยะเวลายาว ๆ ขึ้นกับความต้องการในการใช้งาน

ในการพัฒนาวัสดุทางการแพทย์ได้เริ่มมาตั้งแต่ในอดีตที่ได้มีการนำวัสดุพื้นฐานที่หาได้ง่าย เช่น ทองคำ แก้ว และไม้ นำมาทำเป็นอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนอวัยวะเทียมในทางการแพทย์ ในยุคแรกจุดประสงค์หลักเพื่อค้นหาวัสดุที่มีสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อ หรืออวัยวะภายในร่างกายมนุษย์ ซึ่งผลที่ได้คือวัสดุมีการตอบสนองต่อเนื้อเยื่อภายในต่ำมาก ต่อมาในยุคที่สองเน้นการพัฒนาวัสดุที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาที่ควบคุมได้และเป็นผลดีต่อการเจริญเติบโตของเนื้อเยื่อภายในร่างกายที่ใกล้กับวัสดุ ซึ่งหมายถึงวัสดุที่จะสลายตัวในร่างกาย โดยจะมีเนื้อเยื่อธรรมชาติเจริญเติบโตขึ้นมาแทนที่วัสดุนั้น แต่วัสดุมีการใช้งานที่สั้นเกินไปทำให้การสร้างเนื้อเยื่อในร่างกายขึ้นมาทดแทนนั้นยังทำได้ไม่ 100 % ต่อมาในปัจจุบันเน้นเป็นการช่วยเหลือร่างกายในการซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอ และสามารถกระตุ้นการตอบสนองของเซลล์ภายในร่างกายในระดับโมเลกุล ส่วนอนาคตจะใช้วิศวกรรมเนื้อเยื่อ (Issue engineering) ปลุกฝังเซลล์บางกลุ่มลงไปบนโครงสร้างของวัสดุทางการแพทย์ที่เหมาะสม เพื่อให้เซลล์เกิดการแบ่งตัวและเจริญเติบโต ก่อนที่จะนำไปปลูกถ่ายในร่างกาย เพื่อทำหน้าที่ต่อไป

โดยทั่วไปปัจจัยที่สำคัญในการเลือกใช้หรือพัฒนาวัสดุต่าง ๆ เพื่อนำมาใช้ทางการแพทย์ ได้แก่ ความสามารถในการนำไปใช้งานในร่างกาย ซึ่งต้องสัมผัสกับเนื้อเยื่อ โปรตีนเลือด หรือเซลล์ต่าง ๆ ในร่างกาย เนื่องจากในการใช้วัสดุทางการแพทย์นั้น วัสดุทุกประเภทจะต้องเกิดปฏิกิริยากับเนื้อเยื่อหรือสภาพแวดล้อมในร่างกายไม่มากนักน้อย ทั้งนี้การเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในลักษณะที่วัสดุทางการแพทย์จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อเนื้อเยื่อหรือเซลล์ต่าง ๆ ในร่างกาย เช่น การระคายเคือง อาการแพ้ การติดเชื้อ ความเป็นพิษ และก่อให้เกิดเนื้องอกหรือมะเร็งและลักษณะที่เนื้อเยื่อหรือสภาพแวดล้อมในร่างกายส่งผลกระทบต่อการใช้งานของวัสดุทางการแพทย์ เช่น การเสื่อมสภาพ การกัดกร่อน ซึ่งผลกระทบดังกล่าวที่เกิดขึ้นจะส่งผลอย่างมากต่อความสำเร็จ หรือความล้มเหลว ของวัสดุนั้น ๆ ในการใช้งานทางการแพทย์ แต่ทั้งนี้ย่อมขึ้นกับระยะเวลา ตำแหน่ง และหน้าที่ที่วัสดุทางการแพทย์นั้นจะถูกนำมาใช้งานด้วย ตัวอย่างเช่น วัสดุทางการแพทย์ที่ต้องใช้งานเป็นเวลานานหลายปี เช่น ข้อเทียม หมอนรองกระดูกสันหลังเทียมย่อมมีโอกาสที่จะเกิดผลกระทบจากสภาพภายในร่างกายมากกว่าวัสดุทางการแพทย์ที่ใช้ในระยะเวลายาว ๆ เช่น สายสวนหรือสายล้าง แต่โดยสรุปแล้ว วัสดุที่สามารถนำไปใช้งานทางการแพทย์ได้นั้นจะต้องได้รับการยอมรับจากสภาพภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร่างกายที่ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่าง ๆ ในทางที่ไม่ดีต่อสภาพภายในร่างกายและตัววัสดุนั้นก็จะต้องไม่เกิดการเสื่อมสภาพจากปฏิกิริยากับสภาพในร่างกายมนุษย์

นอกจากนี้แล้ว วัสดุทางการแพทย์จะต้องมีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการ ไม่ว่าจะ เป็นสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี สมบัติทางแสง สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางกล เช่น วัสดุที่นำมาใช้ทดแทนแก้วตาหรือผลิตเลนส์จะต้องมีความใส ในขณะที่วัสดุที่นำไปใช้ทดแทนกระดูก ไม่ต้องคำนึงถึงสมบัติทางแสงดังกล่าวแต่ต้องมีสมบัติทางกลที่เหมาะสม เช่น ความแข็งแรง สามารถรับน้ำหนักหรือแรงกระทำที่เกิดขึ้นจากการใช้งานได้

วัสดุทางการแพทย์ที่ดียังสามารถผลิตขึ้นได้โดยกระบวนการผลิตที่ไม่ยุ่งยากเกินไป และที่สำคัญต้องสามารถทำการฆ่าเชื้อได้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติของวัสดุทางการแพทย์ ในปัจจุบัน ก่อนที่จะนำวัสดุทางการแพทย์มาใช้งานจะต้องผ่านขั้นตอนการทดลองและทดสอบต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก และใช้ระยะเวลาสั้นๆ เพื่อยืนยันถึงประสิทธิภาพและความปลอดภัยในการใช้งาน และขั้นตอนสุดท้ายก่อนนำไปใช้งานจะต้องมีการขออนุญาตจากองค์การอาหารและยาของประเทศนั้น ๆ เพื่อให้แน่ใจว่าผู้ป่วยจะไม่เสี่ยงกับอันตรายจากการใช้งานวัสดุหรืออุปกรณ์ดังกล่าว

ไทเทเนียมจัดเป็นโลหะเฉื่อย (Passive metal) ที่เมื่ออยู่ในสารละลายที่มีออกซิเจนผสมอยู่ จะมีการสร้างฟิล์มเฉื่อยที่อยู่ในสถานะเสถียร (Stable passive film) [26] ของออกไซด์บนผิวของโลหะไทเทเนียม เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ไทเทเนียมไตรออกไซด์ (Ti_2O_3) โดยชั้นของฟิล์มเฉื่อยที่จะเกิดขึ้นนั้นอยู่ในระดับนาโนเมตรและสามารถเสียหายหรือแตกได้ง่าย แต่เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นชั้นฟิล์มก็สามารถสร้างใหม่ได้ด้วยตัวเองในสภาวะออกไซด์ ซึ่งฟิล์มเฉื่อยนี้จะช่วยป้องกันผิวของโลหะไทเทเนียมจากการกัดกร่อน และถ้าในสารละลายที่นำมาทดสอบกับไทเทเนียมนั้นมีส่วนผสมของคลอไรด์ไอออนอยู่ด้วยจะทำให้คลอไรด์ไอออนไปรวมอยู่ในฟิล์มซึ่งไม่เสถียรเท่าฟิล์มของออกไซด์ ทำให้ฟิล์มเกิดการแตกเฉพาะจุดและสามารถหายไปเป็นการกัดกร่อนแบบรูเข็มต่อไปได้ แต่จะไม่เกิดรุนแรงมากนัก เพราะผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการกัดกร่อนจะค่อย ๆ ปกคลุมรอยแตกนั้นให้ปิดสนิทกลายเป็นฟิล์มเฉื่อยอีกครั้ง

2.4 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [28]

2.4.1 บทนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) ใช้เพื่อแก้ปัญหาทางฟิสิกส์ในการวิเคราะห์และออกแบบทางวิศวกรรม ปัญหาทางฟิสิกส์โดยทั่วไปจะเกี่ยวข้องกับโครงสร้างที่แท้จริงหรือส่วนประกอบของโครงสร้างเพื่อที่จะรับภาระให้มั่นคง การทำให้เป็นอุดมคติของปัญหาทางฟิสิกส์สู่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต้องการสมมติฐานที่นำไปสู่ทั้งสมการควบคุมพื้นฐานเชิงอนุพันธ์ (Differential equations governing) และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Material model) การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะแก้ปัญหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เนื่องจากเป็นวิธีเชิงตัวเลขโดยจำเป็นที่จะต้องประมวลผลเพื่อคำตอบที่ถูกต้อง ถ้าไม่เจอคำตอบที่ถูกต้องไฟไนต์เอลิเมนต์จะต้องถูกทำซ้ำด้วยพารามิเตอร์ที่ละเอียดมากขึ้น เช่น การใช้เมชที่ละเอียดมากขึ้น จนกว่าจะเจอคำตอบที่ถูกต้อง

2.4.2 โปรแกรม Abaqus [29]

เป็นโปรแกรมที่เหมาะสมสำหรับโปรแกรมการจำลองทางวิศวกรรม ที่สามารถแก้ปัญหาจากการวิเคราะห์เชิงเส้น (Linear) อย่างง่ายถึงแบบจำลองที่ไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ที่ซับซ้อน Abaqus ประกอบด้วยชนิดของเอลิเมนต์จำนวนมากที่สามารถจำลองได้อย่างสมจริงในทุกรูปแบบและยังมีรายการของแบบจำลองวัสดุที่สามารถจำลองพฤติกรรมของวัสดุทางวิศวกรรมทั่วไปมากมาย เช่น โลหะ, ยาง, โพลีเมอร์, คอมโพสิต, คอนกรีตเสริมเหล็ก, โฟม และวัสดุทางธรณีเทคนิค เช่น ดิน และหิน สามารถใช้ในการศึกษาที่หลากหลาย ได้แก่ ปัญหาทางด้านโครงสร้าง การถ่ายเทความร้อน การถ่ายโอนมวล การจัดการทางความร้อนของส่วนประกอบทางไฟฟ้า (Coupled thermal-electrical analyses), เสี่ยงสะท้อน, กลศาสตร์ของดิน (Coupled pore fluid-stress analyses) และ Piezoelectric analysis ปัญหาที่มีหลายส่วนประกอบจะถูกจำลองโดยการเชื่อมโยงกันแต่ละองค์ประกอบด้วยวัสดุที่เหมาะสมและปฏิสัมพันธ์ของส่วนประกอบที่เฉพาะเจาะจง ในการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น Abaqus สามารถเลือก Load increment ที่เหมาะสมได้อัตโนมัติ และความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้า มีการปรับอย่างต่อเนื่องในระหว่างการวิเคราะห์เพื่อให้มั่นใจได้ว่าจะสามารถหาคำตอบที่ถูกต้องได้อย่างมีประสิทธิภาพ Abaqus/Standard ใช้สำหรับวิเคราะห์ปัญหาทั่วไปทั้งเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นที่เกี่ยวข้องกับสถิตศาสตร์ พลศาสตร์ ความร้อน และการตอบสนองทางไฟฟ้าของส่วนประกอบ แก้ปัญหาระบบของสมการโดยปริยายในแต่ละคำตอบ

Abaqus/Explicit ใช้สูตร Dynamic explicit finite element ในการวิเคราะห์ เหมาะสำหรับ เช่น ปัญหาการชน การระเบิด และยังมีประสิทธิภาพสำหรับปัญหาไม่เชิงเส้นขั้นสูงที่เกี่ยวข้องกับเงื่อนไขการเปลี่ยนสัมผัส เช่น การจำลองการขึ้นรูป

เนื่องจากการจำลองนี้มีการใช้เอลิเมนต์ขนาดเล็กซึ่งจะทำให้ใช้เวลาในการคำนวณนาน จึงมีการใช้ Mass scaling เพื่อช่วยลดเวลาในการคำนวณได้ โดย Mass scaling จะถูกใช้ใน Abaqus/Explicit สำหรับประสิทธิภาพการคำนวณในการวิเคราะห์แบบกึ่งสถิตย์ (Quasi-static) และในการวิเคราะห์พลวัต (Dynamics) บางชนิดที่ประกอบด้วยเอลิเมนต์ขนาดเล็ก ซึ่งสามารถควบคุมการเพิ่มขึ้นของเวลาได้อย่างคงที่

เอลิเมนต์ชนิด Eight-node brick element with reduced integration (C3R8D) เป็นเอลิเมนต์ที่ใช้ทั่วไป เป็นเอลิเมนต์ที่มีแนวโน้มที่จะไม่แข็งพอในการโค้งงอ ความเค้นและความเครียดมีความถูกต้องมากที่ integration point ซึ่งตั้งอยู่ตรงกลางของเอลิเมนต์ ดังนั้นเอลิเมนต์ขนาดเล็กจะต้องจับความเข้มข้นของความเค้นที่ขอบของโครงสร้าง และเอลิเมนต์ชนิด 4-node, bilinear quadrilateral (R3D4) ใช้สำหรับวัตถุแข็งเกร็ง

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการจำลองกระบวนการไฮเพอร์เอลาสติกซึ่งจะมีการบิดเบี้ยวของเอลิเมนต์สูง โดยจะต้องทำการเลือกรูปแบบของเอลิเมนต์ที่เหมาะสม ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 2.5 เพื่อให้การจำลองสามารถดำเนินการต่อไปได้ รวมถึงการตั้งค่าตัวแปรอื่นๆ เช่น Distortion Control, Element Deletion และ Hourglass Control

ตารางที่ 2.3 แสดงความแตกต่างของเอลิเมนต์

รูปแบบเอลิเมนต์	ลำดับความถูกต้อง	การใช้งานที่เหมาะสม
Average strain	Second-order	ทั้งหมด โดยเฉพาะปัญหาที่เกี่ยวข้องกับจำนวนรอบมาก (>5)
Average strain	First order	ทั้งหมด ยกเว้น ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับจำนวนรอบมาก (>5)
Orthogonal	-	ทั้งหมด ยกเว้น ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการจำกัดมาก เมชที่หยาบมาก หรือเอลิเมนต์ที่มีการบิดเบี้ยวสูง
Centroid	-	ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการหมุนของวัตถุแข็งเกร็งเล็กๆ และการทำให้เมชเล็กลง

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ruslan Z. Valiev [30] ได้ทำการศึกษาโดยนำวัสดุไปผ่านกระบวนการเสียรูปถาวรอย่างรุนแรง แล้วพบว่ากระบวนการนี้ส่งผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคและคุณสมบัติของวัสดุ โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงที่ผิดปกติของเฟส ส่งผลให้เกิดความผิดปกติที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงและความเหนียวของวัสดุ จากการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิห้องจะพบว่าวัสดุที่ผ่านกระบวนการเสียรูปอย่างรุนแรงกลายเป็นเกรนละเอียดจะมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น เป็นผลให้มีความหนาแน่นเกิดขึ้นสูงมากในบริเวณขอบเกรนที่มีมุมสูง และเกิดความบกพร่องในผลึก ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงที่มากขึ้นในวัสดุบางชนิด

Yuntian T. Zhu [4] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเสียรูปถาวรอย่างรุนแรง ทำให้ทราบว่าวัสดุที่ผ่านกระบวนการเป็นการเพิ่มความเครียดให้กับวัสดุเป็นผลทำให้วัสดุมีความแข็งแรงที่มากขึ้น แต่จะมีความเหนียวที่ลดลง แต่สามารถเพิ่มความเหนียวให้กับวัสดุได้โดยการอบอ่อนหลังจากผ่านกระบวนการเสียรูปถาวรอย่างรุนแรงซึ่งจะไม่กระทบกับความแข็งแรงของวัสดุ และยังพบว่าไทเทเนียมที่ผ่านกระบวนการจนกลายเป็นวัสดุเกรนละเอียดยังมีความสามารถในการต้านการกัดกร่อนได้มากกว่าไทเทเนียมที่เป็นวัสดุเกรนหยาบอีกด้วย

Pereira et al. [7] ได้ใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการศึกษากระบวนการไหลและวิวัฒนาการของอุณหภูมิในกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันภายใต้เงื่อนไขการจำกัดการไหลที่แตกต่างกัน พบว่าการกระจายตัวของความเครียดประสิทธิผล (Effective strain) ในชิ้นงานมีความไม่แน่นอนเดียวกันมากในการจำลองทุกเงื่อนไข ในกรณีจำกัดการไหลและกึ่งจำกัดการไหลมีพื้นที่ที่แตกต่างกันของการจำกัดการไหลและมีความสม่ำเสมอของความเครียดตามความหนาของตัวอย่างมากกว่ากรณีไม่จำกัดการไหล การกระจายตัวของความเค้นสัทธิมีความเป็นเนื้อเดียวกัน และมีความใกล้เคียงกับค่าความเค้นวิศวกรรม (Nominal stress) หลังจากกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันในกรณีจำกัดการไหลและกึ่งจำกัดการไหล ในกรณีไม่จำกัดการไหล การไล่ระดับของความเค้นเป็นไปตามทิศทางรัศมี วิวัฒนาการของอุณหภูมิในทุกกรณีเป็นไปตามแนวโน้มที่เหมือนกัน

Wei et al. [31] ได้ทำการศึกษาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน โดยใช้ซอฟต์แวร์ Abaqus โดยตัวอย่างประกอบด้วยทองแดงบริสุทธิ์ ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และมีความหนา 0.8 มิลลิเมตร มีการเลือกใช้ C3D8R เป็นเอลิเมนต์ของตัวอย่าง และแอนวิลกำหนดเป็นวัตถุแข็งเกร็ง กำหนดแรงเสียดทาน 0.1 ซึ่งเป็นค่าทั่วไปสำหรับการขึ้นรูปแบบเย็น โดยในระหว่างการวิเคราะห์ความเครียดการบิดที่มากขึ้น ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของเมช ทำให้การจำลองหยุดลง จึงมีการใช้ Mesh to mesh solution mapping ซึ่งเป็น ใช้เพื่อเปลี่ยนค่าตัวแปรทั้งหมดจากเมชเก่าไป

เมฆใหม่ จากนั้นการจำลองจะเริ่มต้นใหม่และทำตามวิธีเดิมจนกว่าจะได้จำนวนรอบที่ต้องการ พบว่าค่าคำตอบมีความถูกต้องหลังจากทำการ Map จากเมฆเก่าไปสร้างเมฆใหม่ และทำให้สามารถเพิ่มมุมในการหมุนได้มากขึ้น

Khiavi et al. [32] ได้ทำการศึกษาการกระจายความเค้นและวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของ Al 5452 Alloy ด้วยกระบวนการไฮเพรสเชอร์ทอร์ชันแบบไม่จำกัดการไหล โดยทำการจำลองโดยใช้โปรแกรม Abaqus/Explicit โดยขั้นตอนที่ 1 ทำการให้แรงดันที่จุดอ้างอิงของแอนวิลด้านบน และการเคลื่อนที่ในแกน Y ลบ โดยที่แอนวิลด้านล่างกำหนดให้อยู่กับที่และไม่เคลื่อนที่ ในขั้นตอนที่ 2 การบิด แอนวิลด้านล่างหมุนรอบแกน Y และทำการกำหนดจำนวนรอบของตัวอย่างด้วยแอนวิลด้านล่าง โดยที่ยังคงรักษาแรงดันบนตัวอย่างเอาไว้ และเกิดการลดลงของความสูงเนื่องจากแรงดัน ระยะการกระจัดของแอนวิลด้านบนเป็นอิสระตามแนวแกน Y กำหนดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างแอนวิลด้านบนและพื้นผิวตัวอย่างเป็น 0.25 และระหว่างแอนวิลด้านล่างกับพื้นผิวตัวอย่างกำหนดเป็น 0.275 แรงดันที่ใช้คือ 1.5, 1.86, 2.3 และ 3.3 GPa ตัวอย่างจะใช้เมชชนิด C3R8D และสำหรับแอนวิลที่กำหนดเป็นวัสดุแข็งเกร็งใช้เมชชนิด R3D4 และเนื่องจากเกิดการบิดเบี้ยวของเมชมากจึงมีการใช้ Adaptive mesh ในการจำลองด้วย จากการเปรียบเทียบผลการทดลองและผลจากการจำลองแล้วมีความใกล้เคียงกัน

Nie et al. [20] ได้ทำการศึกษาในวัสดุไทเทเนียมบริสุทธิ์ (ASTM Grade2) ที่ได้นำไปผ่านกระบวนการไฮเพรสเชอร์ทอร์ชัน (High pressure torsion) ในจำนวนรอบบิดที่ต่างกัน ภายใต้แรงดัน 6.0 GPa. แต่ก่อนนำไปผ่านกระบวนการไฮเพรสเชอร์ทอร์ชัน ได้มีการอบอ่อนก่อนที่ 700 °C จากนั้นจึงนำไปแช่ในสารละลาย NaCl 3.5% เพื่อทำการวัดศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด ตามด้วยวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีเชิงเคมีไฟฟ้า และทำการทดสอบโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน ซึ่งผลการทดสอบเคมีไฟฟ้าแสดงความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างความต้านทานการกัดกร่อนและการปรับแต่งเกรน ดังนั้นการวัดค่าความเค้นระดับไมโครเผยให้เห็นถึงระดับความเค้นที่พัฒนาหรือดีขึ้นสำหรับวัสดุไทเทเนียมบริสุทธิ์หลังจากที่ผ่านกระบวนการไฮเพรสเชอร์ทอร์ชัน แต่ความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานไทเทเนียมที่ผ่านกระบวนการไฮเพรสเชอร์ทอร์ชัน และแช่ในสารละลาย NaCl โดยเทคนิคเคมีไฟฟ้านั้นต่ำกว่าชิ้นงานไทเทเนียมเนื้อผิวหยาบที่ยังไม่ผ่านการอบอ่อนและกระบวนการไฮเพรสเชอร์ทอร์ชันเลย ในส่วนของความไวต่อการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการไฮเพรสเชอร์ทอร์ชันจะลดลงเมื่อความเครียดที่เกิดจากจำนวนรอบของการบิดที่เพิ่มขึ้น

Wang et al. [33] ได้ทำการศึกษาวัสดุโลหะผสม Hypoeutectic Al-7Si ที่มีโครงสร้างจุลภาคที่หลากหลาย เพื่อตรวจสอบผลกระทบของการปรับแต่งเกรนต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนใน NaCl 3.5% จากการวิเคราะห์ผลการวัดศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดและเส้นโค้งโพลาริเซชันแสดงให้เห็นว่าความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านทานการกัดกร่อนของโลหะได้รับการพัฒนาที่ดีขึ้นเมื่อความเครียดจากจำนวนรอบการบิดที่สูงขึ้น และการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีเชิงเคมีไฟฟ้ารวมกับการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบ SEM และ XPS บ่งบอกว่าประสิทธิภาพการกัดกร่อนของโลหะผสมเกิดจากการแตกของอนุภาคซิลิกอนในตัวโลหะขณะแช่ในสารละลาย แต่เมื่อจำนวนรอบของการผ่านกระบวนการไฮเพรสเซอร์ชันสูงขึ้น ก็จะทำให้ความแข็งแรงระดับไมโครเพิ่มขึ้น

Barjaktarevic et al. [9] ได้นำวัสดุไทเทเนียมบริสุทธิ์ (cpTi) กับ Ti-13Nb-13Zr (TNZ) มาทำกระบวนการไฮเพรสเซอร์ชัน ภายใต้แรงดัน 4.1 GPa. ด้วยความเร็วรอบการหมุน 0.2 รอบต่อวินาที จำนวนรอบสูงสุดคือ 5 รอบ ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบ SEM ก็จะสามารถแยกออกมาได้เป็นเกรนหยาบ (Coarse-grained, CG) และเกรนละเอียด (Ultrafine-grained, UFG) ของทั้งวัสดุไทเทเนียม 2 ประเภท ก็จะจำแนกการวิเคราะห์เป็น CG cpTi, UFG cpTi, CG TNZ, UFG TNZ ทั้งหมด 4 แบบ ได้ทำการนำไปวัดเคมีไฟฟ้าด้วยการแช่ในสารละลายเทียมที่มีค่า pH 5.5 และขึ้นงานถูกวิเคราะห์โดยการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีเชิงเคมีไฟฟ้า และทำการทดสอบโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริไซซ์ ได้ผลว่ากระบวนการไฮเพรสเซอร์ชันได้ลดขนาดเกรนลงเยอะมาก นอกจากนี้หลังการวัดเคมีไฟฟ้าแล้ว UFG cpTi มีความต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับ CG cpTi ในขณะที่ UFG TNZ มีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ CG TNZ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีความขัดแย้งกัน

Torbati-Sarraf et al. [34] ได้ทำการศึกษาวัสดุโลหะผสมแมกนีเซียม ZK60 ผ่านกระบวนการไฮเพรสเซอร์ชันโดยทำการบิดหมุนจำนวนรอบมากที่สุด 20 รอบ และแช่ในสารละลาย NaCl 0.1 โมล จากนั้นทำการวัดเคมีไฟฟ้าผ่านโพลาริไซซ์ อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีเชิงเคมีไฟฟ้า Mott-Scottky และการทดสอบไฮโดรเจน ผลลัพธ์ที่ได้คือยิ่งจำนวนรอบการบิดหรือหมุนมากเท่าไรยิ่งทำให้ความสม่ำเสมอของเกรนละเอียดขึ้น อีกทั้งยังลดการกัดกร่อนของโลหะผสมได้อย่างมีประสิทธิภาพผ่านการสร้างฟิล์มเฉื่อยหรือฟิล์มออกไซด์บริเวณของเกรน

จากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องพบว่ากระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีไฮเพรสเซอร์ชันนั้นมีแนวโน้มที่จะพัฒนาสมบัติของวัสดุได้ ทั้งในด้านความแข็งแรงและความต้านทานการกัดกร่อนซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญในวัสดุทางการแพทย์ โดยสามารถนำวิธีการจำลองทางคอมพิวเตอร์มาใช้ในการวิเคราะห์ร่วมกับการทดสอบชิ้นงานจริงได้ โดยจะทำการศึกษาในบทความต่อไป

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน

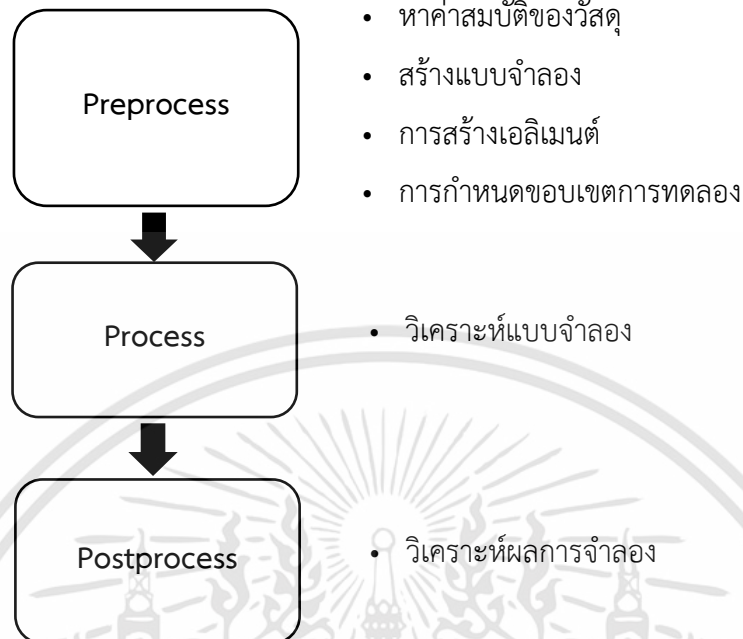
เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการดำเนินงาน เพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ขั้นตอนการดำเนินงานได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังแสดงในรูป 3.1 โดยมีรายละเอียดดังนี้

ส่วนที่ 1 Numerical Method เป็นส่วนของการจำลองพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุที่ผ่านกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน ซึ่งในส่วนนี้ประกอบด้วย Pre-processing, Simulation module และ Post-processing โดย Pre-process คือการเตรียมข้อมูลก่อนนำไปวิเคราะห์ผล ประกอบด้วย การหาค่าสมบัติของวัสดุจากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการจำลอง และการเตรียมแบบจำลอง จากนั้นทำการ Simulation module ผ่านโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ โดยจะต้องสร้างและกำหนดเอลิเมนต์ กำหนดขอบเขตของการทดลอง รวมทั้งคุณสมบัติของวัสดุ โดยโครงการวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรม Abaqus เพื่อจำลองโดยใช้ระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ จากนั้นนำผลที่ได้จากการผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์ผลที่ได้ซึ่งก็คือ Post-processing

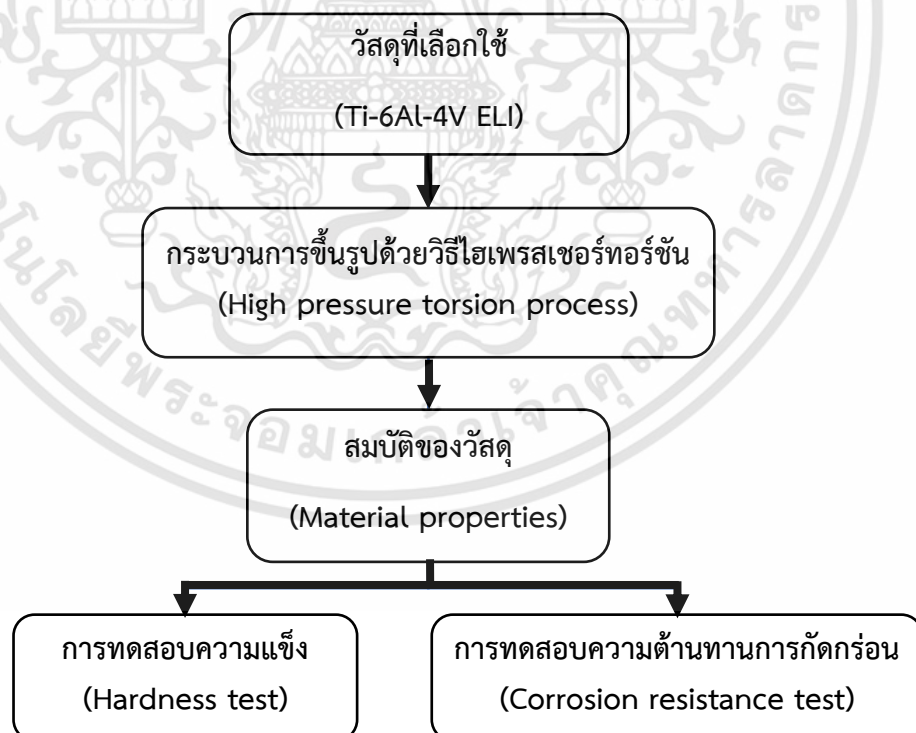
ส่วนที่ 2 การทดลองหาสมบัติของวัสดุก่อนและหลังผ่านกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน โดยเริ่มต้นจากการเตรียมชิ้นงาน Ti-6Al-4V ELI ให้อยู่ในขนาดที่เหมาะสม แล้วนำไปผ่านกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน โดยกำหนดเงื่อนไขในรูปแบบต่าง ๆ แล้วนำมาทดสอบสมบัติของวัสดุ ซึ่งโครงการวิจัยเลือกการทดสอบ 2 ชนิด ได้แก่ การทดสอบความแข็งแบบจุลภาคเพื่อวิเคราะห์ความแข็งระดับจุลภาคของวัสดุ และการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยวิธี Polarization สำหรับการวิเคราะห์ความต้านทานการกัดกร่อน

โดยรายละเอียดการทดลองจะถูกกล่าวในหัวข้อถัดไป

ส่วนที่ 1



ส่วนที่ 2



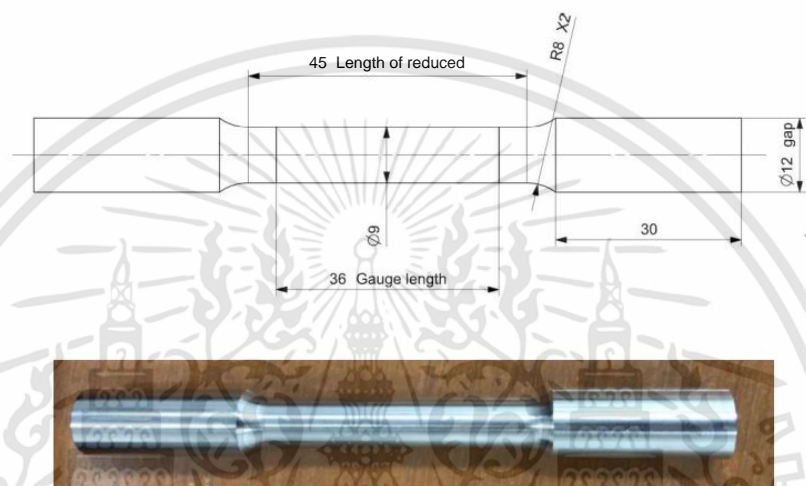
รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

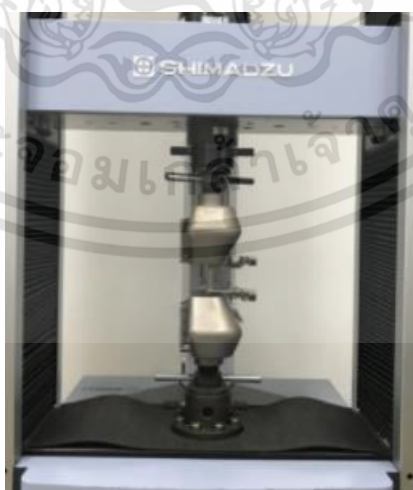
3.1.1 การทดสอบแรงดึงเพื่อหาสมบัติของวัสดุ

ทำการเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดสอบโดยขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงดึง (Tensile test) อ้างอิงตามมาตรฐานสำหรับชิ้นงานโลหะทดสอบแรงดึง ASTM standard E8/E8M-09 โดยวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นไทเทเนียมที่มีลักษณะเป็นแท่งตามมาตรฐาน JIS G 3141 ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงแบบชิ้นงานสำหรับใช้ทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM standards E8/E8M – 09

ทำการทดสอบแรงดึงที่อัตราการความเครียด (Strain rate) เท่ากับ $4.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ โดยเครื่องทดสอบแรงดึง รุ่น Shimadzu autograph AG-X ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงเครื่องทดสอบแรงดึง รุ่น Shimadzu autograph AG-X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการคำนวณหาค่า Engineering stress, s จาก

$$s = \frac{P}{A_0} \quad (3.1)$$

และค่า Engineering strain, e จาก

$$e = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (3.2)$$

คำนวณหาค่า True stress, σ จาก

$$\sigma = s(1 + e) \quad (3.3)$$

และค่า True strain, ϵ จาก

$$\epsilon = \ln(1 + e) \quad (3.4)$$

โดยกำหนด $A_0 = 4.5 \times 4.5 \times \pi = 63.62$ ตารางมิลลิเมตร และ $L_0 = 36$ มิลลิเมตร

ทำการคำนวณหา Material Model จาก power-law equation

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (3.5)$$

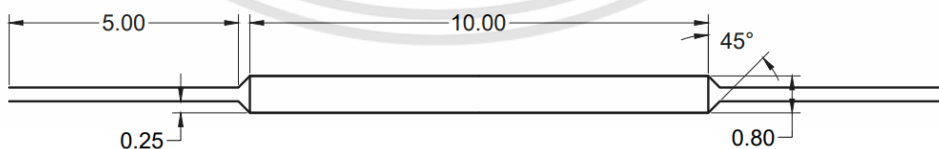
โดยที่ σ คือค่า true stress, ϵ คือค่า true strain, K คือค่า Strength coefficient, n คือค่าความชันของกราฟ (Strain – hardening exponent) ทำการคำนวณโดยเลือกช่วง Yield stress ถึง Max stress ทำการพล็อตกราฟ log stress – log strain และ ทำการ regression จะได้สมการ Power-law

3.1.2 การจำลองการเสีรูปทางคอมพิวเตอร์

สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยโปรแกรม Abaqus/CAE 6.14 with Explicit model โดยกำหนดวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ Ti-4Al-6V ELI ซึ่งชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่นดิสก์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และมีความหนา 0.8 มิลลิเมตร และมีค่า Young's Modulus 83,050 MPa, Poisson's ratio 0.34 และ material model คือ $\sigma = 1280.59e^{0.074}$ ผ่านกระบวนการผลิตโดยวิธีไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันแบบกึ่งจำกัดการไหล (Quasi-constrained) โดยที่ anvil มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร และความสูง 30 เซนติเมตร ที่พื้นผิวด้านที่ยึดจับตัวอย่างจะมีรอยตื้นมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตรและความลึก 0.25 มิลลิเมตร พื้นผิวด้านข้างมีความลาดเอียง 45° ซึ่งกำหนดให้เป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) โดยกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันมี 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 การกด เป็นการให้แรงดัน 6.0 GPa ที่พื้นผิวด้านบนของชิ้นงาน ขั้นตอนที่ 2 การกดและการบิด ทำการกำหนดมุมบิดที่จุดอ้างอิงของ anvil ตัวล่าง โดยทำการจำลองที่จำนวนรอบสูงสุด 10 รอบ ใช้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.4 ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างไทเทเนียมอัลลอยและเหล็กอ้างอิงจากงานวิจัย [35],[36] โดยชิ้นงานใช้เมชชนิด C3R8D จำนวน 21,290 เอลิเมนต์ และแต่ละ anvil ใช้เมชชนิด R3D4 จำนวน 1,785 เอลิเมนต์ ซึ่งมีรายละเอียดในการสร้างแบบจำลองโดยแยกเป็นแต่ละโมดูลได้แก่ Part, Properties, Assembly, Step, Interaction, Load, Mesh, Job โดยแบ่งเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

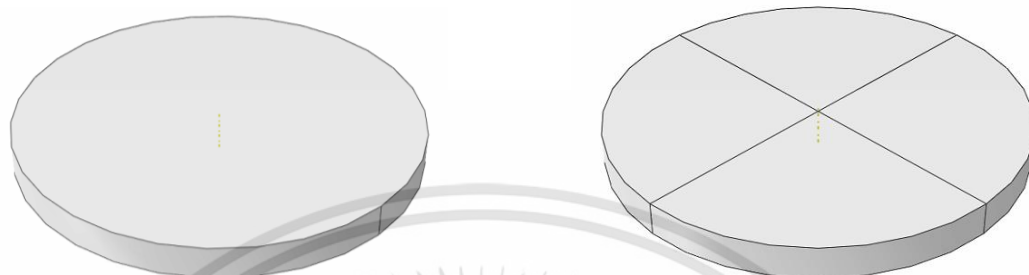
ขั้นตอนที่ 1 Part

ทำการสร้างแบบจำลอง โดยที่ชิ้นงานเป็นชนิด deformable มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตรและมีความหนา 0.8 มิลลิเมตร และ anvil มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร มีความลึก 0.25 มิลลิเมตร และผนังด้านข้างมีความลาดเอียง 45° ตามภาพเขียนแบบที่แสดงดังรูปที่ 3.4 ในโปรแกรม Abaqus



รูปที่ 3.4 แสดงขนาดแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองชิ้นงานจะมีลักษณะเป็นแผ่นดิสก์ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 มิลลิเมตร และความหนา 0.8 มิลลิเมตร ดังรูป 3.5 โดยจากนั้นทำการแบ่งชิ้นงานเป็น 4 ส่วนดังภาพที่ 3.6 โดยใช้เครื่องมือ Partition cell



รูปที่ 3.5 แสดงตัวอย่างชิ้นงาน

รูปที่ 3.6 แสดงการแบ่งส่วนของชิ้นงาน

การสร้างแบบจำลอง anvil จะเลือกสร้างเฉพาะส่วนที่เป็นรอยตื้นลงไป เนื่องจากกำหนดให้เป็น rigid body โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ความลึก 0.25 มิลลิเมตร และที่ผนังมีความลาดเอียงจากแนวตั้ง 45° ดังรูปที่ 3.7 และสร้าง anvil ด้านล่าง จากการ copy anvil ด้านบน โดยทำการเลือก Mirror part about : X-Z plane



รูปที่ 3.7 แสดงตัวอย่าง anvil

ขั้นตอนที่ 2 Properties

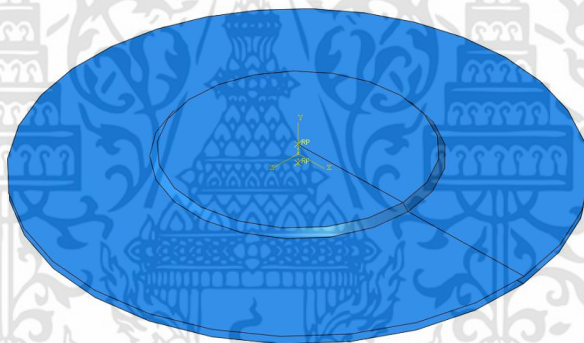
กำหนดคุณสมบัติของวัสดุจากการทดสอบแรงดึง ดังตารางที่ 3.1 และเนื่องจาก anvil ถูกกำหนดให้เป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) จึงไม่ต้องทำการกำหนดคุณสมบัติ

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติของ Ti-4Al-6V ELI

คุณสมบัติ	ค่าตัวแปร	ค่าที่ป้อนในโปรแกรม Abaqus
Density	4.43 g/cm ³	4.43E-9
Young's modulus	83,050 MPa	83050
Poisson's ratio	0.34	0.34
Yield stress	901.03 MPa	901.03
Material model	$\sigma = 1280.59\varepsilon^{0.074}$	K=1280.59, n=0.074

ขั้นตอนที่ 3 Assembly

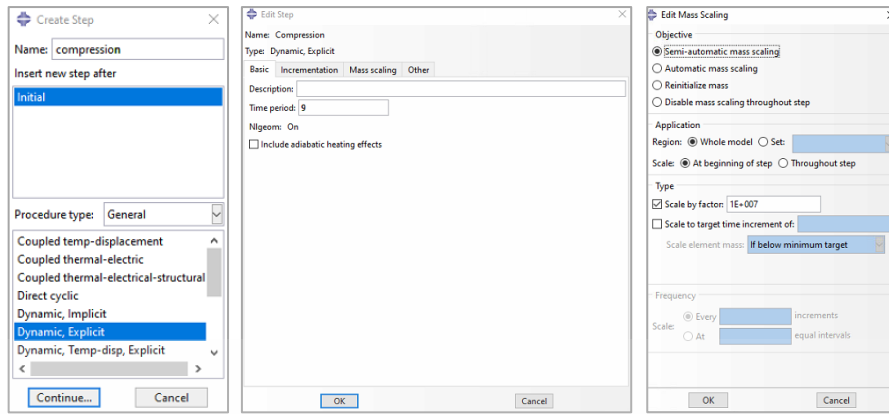
ทำการประกอบชิ้นงานและ anvil ทั้ง 3 ส่วนเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงการประกอบชิ้นส่วน

ขั้นตอนที่ 4 Step

ทำการสร้าง step โดยใช้วิธี Dynamic, Explicit โดยกำหนด Time period มีค่าเท่ากับ 9 และกำหนด Mass scaling ชนิด scale factor มีค่าเท่ากับ 1E+007 ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงหน้าต่าง create step, Edit Step และ Mass scaling

ขั้นตอนที่ 5 Interaction

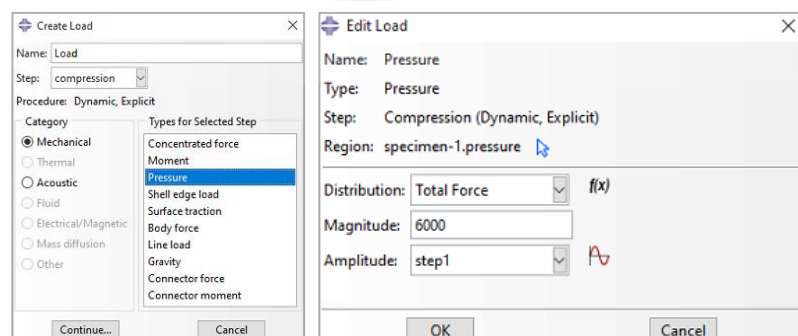
ทำการสร้างสัมผัสโดยพื้นผิวด้านในของ anvil ด้านบนสัมผัสกับพื้นผิวด้านบนและด้านข้างของชิ้นงาน ดังรูปที่ ส่วนพื้นผิวด้านในของ anvil ด้านล่างสัมผัสกับพื้นผิวด้านล่างและด้านข้างของชิ้นงานดังรูปที่ 3.10 โดยกำหนดแรงเสียดทานระหว่างชิ้นงานและ anvil มีค่าเท่ากับ 0.4



รูปที่ 3.10 แสดงการสร้างสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับ anvil ด้านบน (ซ้าย) และ anvil ด้านล่าง (ขวา)

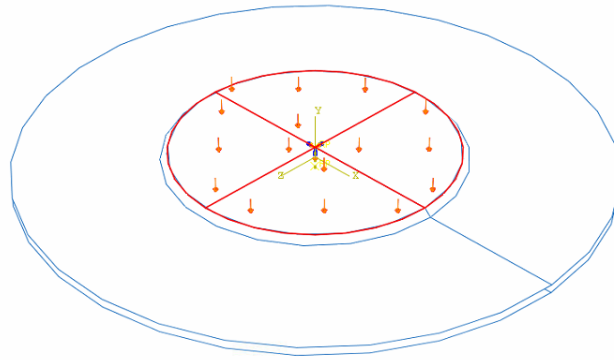
ขั้นตอนที่ 6 Load

ทำการกำหนดแรงดันบนพื้นผิวด้านบนที่ความดัน (Pressure) 6.0 GPa ดังรูปที่ 3.11 จะได้ผลดังรูปที่ 3.12



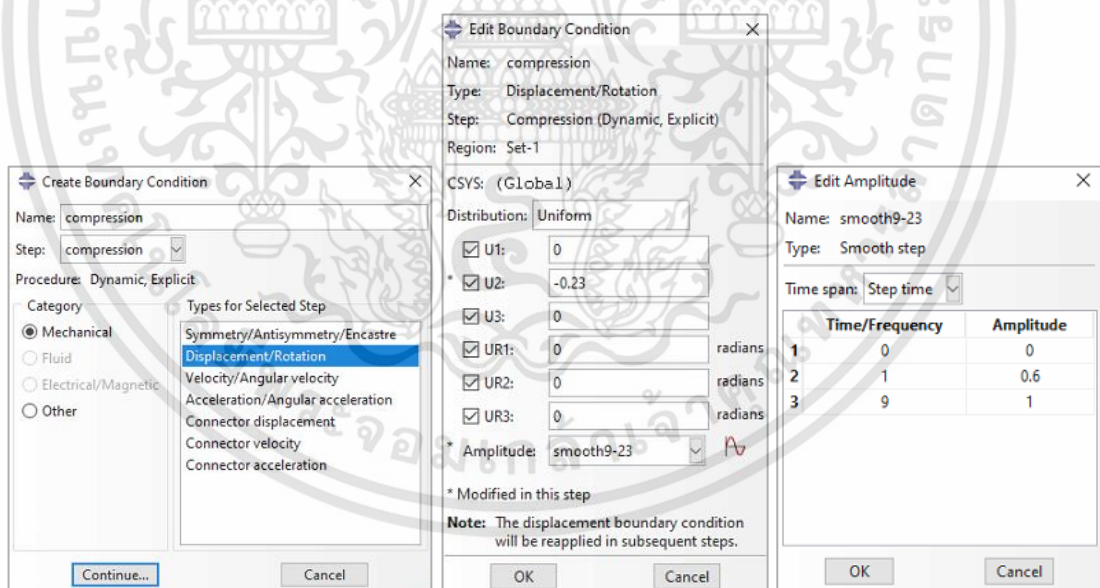
รูปที่ 3.11 แสดงหน้าต่าง create load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



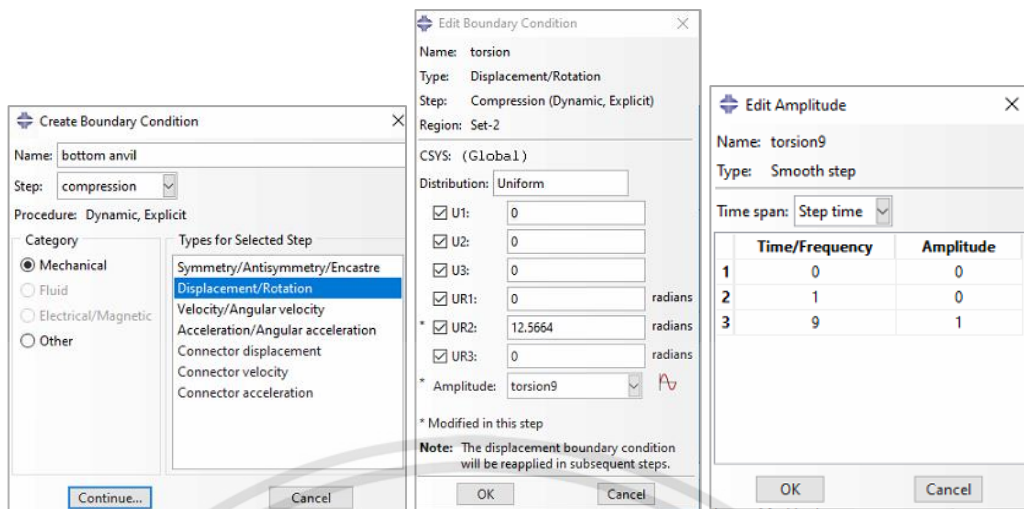
รูปที่ 3.12 แสดงการกำหนดโหลด

ทำการกำหนดเงื่อนไขขอบ โดยกำหนดให้ anvil ด้านบน โดยเลือกที่จุดอ้างอิงของ anvil ด้านบน เคลื่อนที่ตามแนวแกน Y ในทิศทางลบ -0.23 มิลลิเมตร และกำหนด amplitude เป็นชนิด smooth step 0,0 1,0.6 9,1 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และกำหนดให้ anvil ด้านล่าง โดยเลือกที่จุดอ้างอิงของ anvil ด้านล่าง เคลื่อนที่รอบแนวแกน Y 2π radians และกำหนด amplitude เป็นชนิด smooth step 0,0 1,0 9,1 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.14 โดยจะทำการกดเป็นเวลา 1 วินาที และการหมุนพร้อมกด 8 วินาที



รูปที่ 3.13 แสดงหน้าต่าง create Boundary condition และ amplitude ของการกด

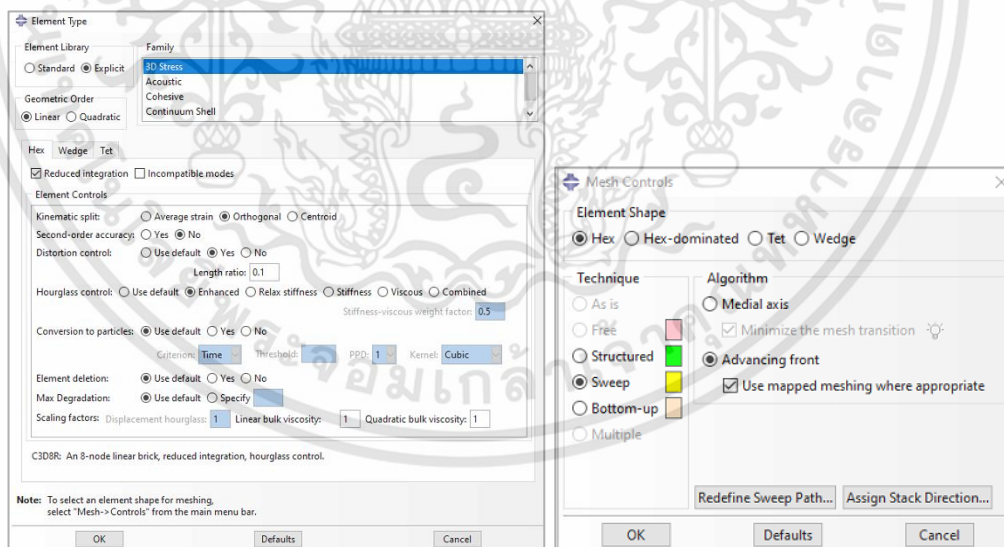
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 แสดงหน้าต่าง create Boundary condition และ amplitude ของการหมุน

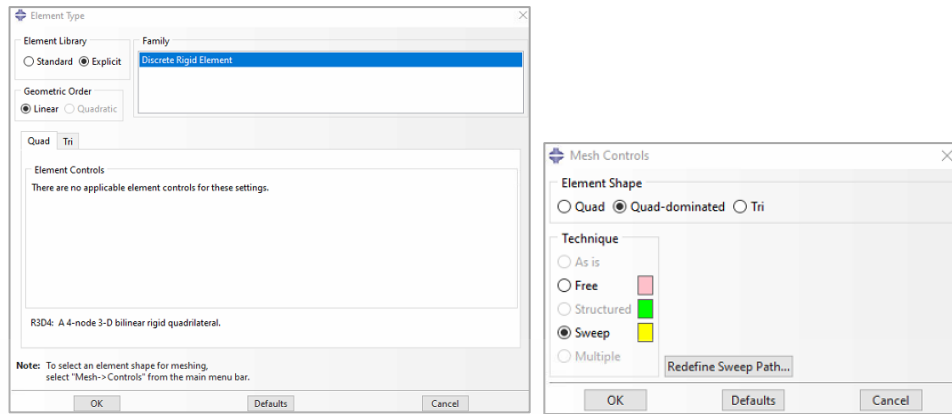
ขั้นตอนที่ 7 Mesh

ชิ้นงานใช้ mesh ชนิด C3D8R ขนาด 0.15 จำนวน 21,290 เอลิเมนต์ และใช้ mesh control เทคนิค sweep อัลกอริทึม Advancing front ดังรูปที่ 3.15 และ anvil ใช้ชนิด R3D4 ขนาด 0.30 จำนวน 1,785 เอลิเมนต์ และใช้ mesh control เทคนิค sweep ดังรูปที่ 3.16 และได้ผลการเมชดังรูปที่ 3.17

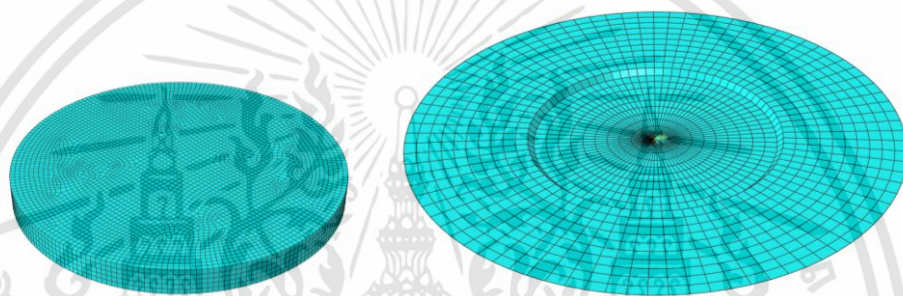


รูปที่ 3.15 แสดงหน้าต่าง Element Type และ mesh control ของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 แสดงหน้าต่าง Element Type และ mesh control ของ anvil



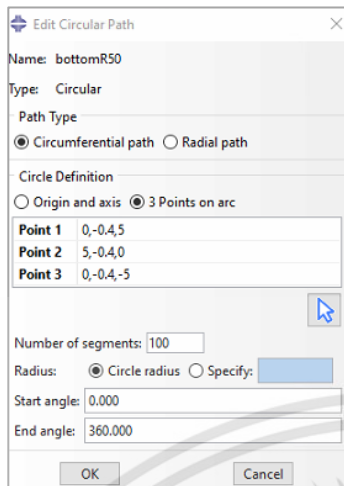
รูปที่ 3.17 แสดงการเมชชิ้นงาน (ซ้าย) และ anvil (ขวา)

ขั้นตอนที่ 8 Job

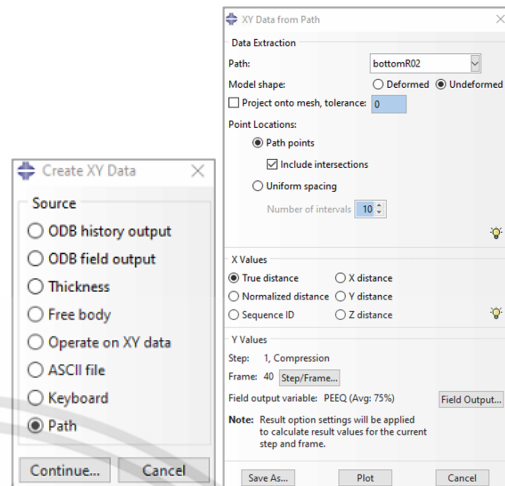
ทำการสร้างงานโดยเลือก Abaqus explicit precision : double – analysis + packager โดยแท็บอื่นที่ไม่ได้กล่าวถึงให้คงเดิมไว้แล้วกด OK จากนั้นกด Data Check เมื่อเรียบร้อยแล้ว กด Submit เพื่อ Run model

หลังการจำลองทางคอมพิวเตอร์ทำการเก็บข้อมูลค่า Equivalent plastic strain เฉลี่ย โดยทำการสร้าง circular path ที่ ระยะทางทุกๆ 0.2 มิลลิเมตรตั้งแต่ 0.2 – 5.0 มิลลิเมตร จากจุดศูนย์กลางดังรูปที่ 3.18 จากนั้นทำการเก็บข้อมูลที่จำนวนรอบการหมุน 1/4, 1/2, 3/4 และ 1 รอบ โดยกำหนด Frame ที่ 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ และเลือก field output เป็น PEEQ ดังรูปที่ 3.19 จากนั้นนำข้อมูลที่ 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 และ 5.0 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.20 มาหาค่าเฉลี่ย จะได้ค่า Equivalent plastic strain เฉลี่ยที่ระยะทางจากจุดศูนย์กลางต่างๆ และการเก็บข้อมูล เฉลี่ยบนพื้นผิวทั้งชิ้นงานจะเก็บข้อมูลทั้งหมดเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยทั้งชิ้นงาน สำหรับข้อมูลที่จุดศูนย์กลางไม่สามารถหาค่าได้ จะใช้เครื่องมือ probe value เพื่อหาค่า Equivalent plastic strain ของเอลิเมนต์ 4 เอลิเมนต์รอบจุดศูนย์กลาง จากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ยจะได้ค่า Equivalent plastic strain เฉลี่ยที่จุดศูนย์กลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 แสดงการสร้าง circular path



รูปที่ 3.19 แสดงการเก็บข้อมูล



รูปที่ 3.20 แสดง Circular path ที่ระยะทาง 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 และ 5.0 มิลลิเมตร จากจุดศูนย์กลางตามลำดับ

3.2 การศึกษาสมบัติของวัสดุ

วัสดุที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ Ti-6Al-4V ELI Alloy ซึ่งเป็นโลหะผสมไทเทเนียมที่ถูกใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์อย่างแพร่หลาย โดยมีองค์ประกอบทางเคมีที่แสดงดังตารางที่ 3.2

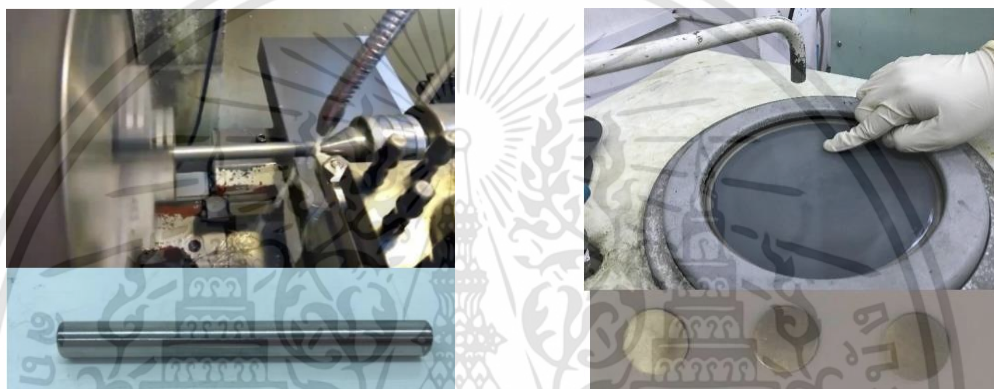
ตารางที่ 3.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของ Ti-6Al-4V ELI

องค์ประกอบทางเคมี (%โดยน้ำหนัก)										
O	N	C	H	Fe	Al	V	Ni	Mo	Other	Residuals
0.13	0.03	0.08	0.0125	0.25	5.5-6.5	3.5-4.5				0.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

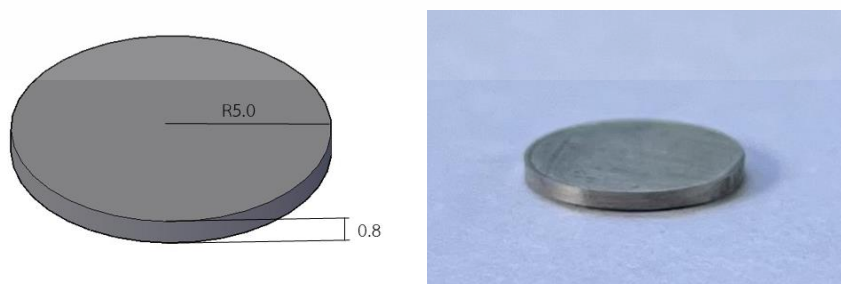
3.2.1 กระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน

ทำการเตรียมชิ้นงานโดยทำการกลึงแท่ง Ti-6Al-4V ELI ทรงกระบอกตัน จากเดิมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.6 มิลลิเมตร ให้เหลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร โดยที่มีความยาว 100 มิลลิเมตร ด้วยเครื่อง CNC ดังภาพที่ 3.21 และนำแท่งทรงกระบอกตันที่ทำการกลึงแล้ว มาตัดด้วยเครื่องตัดละเอียด ให้มีลักษณะเป็นดิสก์ที่มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้จากการตัดละเอียดมาขัดด้วยกระดาษทราย Silicon Carbide (SiC) ตั้งแต่เบอร์ 180, 240, 400, 600, 800 และ 1200 grit ให้มีความหนาสุดท้าย 0.8-0.85 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.21 แสดงการกลึงด้วยเครื่อง CNC รูปที่ 3.22 แสดงการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทราย

หลังจากได้ชิ้นงานทดสอบ Ti-6Al-4V ELI ที่มีลักษณะเป็นแผ่นดิสก์ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และมีความหนา 0.8 - 0.85 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.23 จะถูกนำไปผ่านกระบวนการผลิตที่จะทำให้เกรนละเอียดมากขึ้นโดยใช้วิธีไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยมีเงื่อนไขการทดสอบดังตารางที่ 3.3 และมีตัวแปรคงที่ ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน ความเร็วรอบ และตัวแปรที่ศึกษาคือจำนวนรอบ ซึ่งก็คือ ความเครียดที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบ เพื่อใช้ในการศึกษาวิวัฒนาการของโครงสร้างและสมบัติของวัสดุภายใต้ความเครียดที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.23 แสดงชิ้นงานทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 แสดงเงื่อนไขการขึ้นรูปด้วยวิธีไฮเพรสเซอร์

อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิห้อง
ความดัน (GPa)	6.0
ความเร็วรอบ (rpm)	1.5
จำนวนรอบ (รอบ)	1/4, 1/2, 5 และ 10

3.2.2 การทดสอบความแข็ง

ทำการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานก่อนและหลังผ่านกระบวนการเสีรูปร่างไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันที่จำนวนรอบ 1/4, 1/2, 5 และ 10 รอบ แล้วนำมาพิจารณาเปรียบเทียบกันโดยมีขั้นตอนการหาค่าความแข็งดังต่อไปนี้

ทำการเตรียมชิ้นงานก่อนวัดค่าความแข็งโดยการขึ้นเรือน (Mounting) ใช้การขึ้นเรือนแบบเย็น (Cold Mounting) โดยการวางชิ้นงานไว้ในแบบหล่อ แล้วเทเรซินลงไปรอจนแห้งจึงนำออกจากแบบหล่อ ดังรูปที่ 3.24 จากนั้นทำการขัดด้านผิวหน้าของชิ้นงานทดสอบ โดยขัดด้วยกระดาษทราย SiC ตามมาตรฐาน ANSI ตั้งแต่เบอร์ 180, 240, 400, 600, 800 และ 1200 ตามลำดับ โดยใช้น้ำเป็นตัวหล่อลื่นตลอดการขัด และขัดแบบ Fixed Abrasive Bonding แล้วทำการขัดเงาด้วยผ้าขัดและน้ำยาขัด Diamond Suspension ขนาด 6 ไมครอน และ 3 ไมครอน ตามลำดับ



รูปที่ 3.24 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการ Mounting

ทำการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานในงานวิจัยนี้ใช้การวัดความแข็งระดับจุลภาค (Microhardness) โดยใช้วิธีการทดสอบความแข็งแบบจุลภาคของวิกเกอร์ส (Vickers microhardness test) โดยใช้เครื่อง Buehler TUKON 1102 ดังรูปที่ 3.25 ด้วยโหลด 500 กรัมแรง Dwell time 15 วินาที โดยการวัดความแข็งแบ่งออกเป็น 2 แบบ ดังนี้

1) การวัดค่าความแข็งแบบจุลภาคเฉลี่ยตามแนวรัศมีของชิ้นงาน

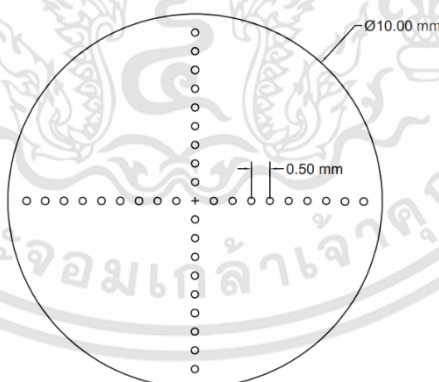
เพื่อศึกษาค่าความแข็งที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่แปรผันจากบริเวณจุดศูนย์กลางถึงขอบของชิ้นงาน โดยแต่ละตำแหน่งจะมีระยะห่าง 0.5 มิลลิเมตร จากนั้นทำการคำนวณหาค่าความแข็งเฉลี่ยของตำแหน่งทั้งหมดจาก 4 แนวรัศมี ดังที่แสดงในรูปที่ 3.26

2) การวัดการกระจายความแข็งที่ตำแหน่งต่าง ๆ

เพื่อศึกษาค่าความแข็ง เนื่องจากลักษณะการเสียรูปตลอดผิวของชิ้นงานที่มีความสมมาตรกัน เนื่องจากมีการให้ค่าความเครียดที่สม่ำเสมอจากกระบวนการไฮเพอร์ซเซอร์ทอร์ชัน จึงทำการวัดค่าความแข็งเพียง 1 ควอดแรนต์ ดังที่แสดงในรูปที่ 3.27

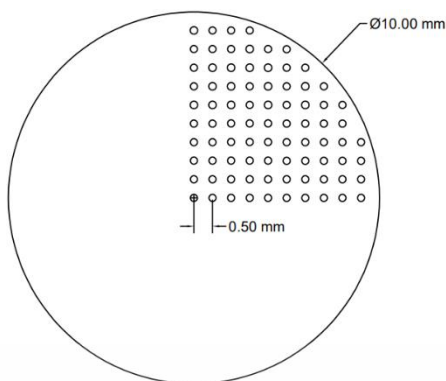


รูปที่ 3.25 เครื่องวัดค่าความแข็ง Buehler TUKON 1102



รูปที่ 3.26 แสดงตำแหน่งที่วัดค่าความแข็งบนชิ้นงานตามแนวรัศมีจากบริเวณเส้นผ่านศูนย์กลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 แสดงตำแหน่งที่วัดค่าความแข็งบนชิ้นงานบริเวณควอดแรนต์ที่ 1

3.2.3 การทดสอบการกัดกร่อน (Corrosion Test)

เราทำการทดสอบการกัดกร่อนเพื่อดูผลของกระบวนการไฮเพอร์ซอร์ทอร์ชัน ต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมไทเทเนียม Ti-6Al-4V ELI โดยใช้เทคนิคเคมีไฟฟ้า และกราฟโพลาริเซชัน จะถูกใช้เพื่อแสดงลักษณะสมบัติการกัดกร่อนของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านและไม่ผ่าน กระบวนการไฮเพอร์ซอร์ทอร์ชัน โดยมีขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ดังนี้

- 1) เรานำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการไฮเพอร์ซอร์ทอร์ชัน มาตัดครึ่งด้านข้างออกด้วยกรรไกร เพื่อให้ง่ายต่อการขัดผิวและเพื่อไม่ให้เศษครีบหลุดเข้าไปโดนผิวหน้าชิ้นงานขณะทำการขัดดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการไฮเพอร์ซอร์ทอร์ชัน

- 2) เราทำการขัดผิวชิ้นงานด้วยเครื่องขัดผิวแบบจานหมุนยี่ห้อ BUEHLER รุ่น METASERU250 ดังรูปที่ 3.29 โดยการขัดด้าน Top view จากที่ได้เข้าเครื่อง anvil มา ซึ่งจะขัดด้วยกระดาษทราย (Silicon carbide) ขนาด 400, 600, 800, 1200, 2500 และ 4000 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



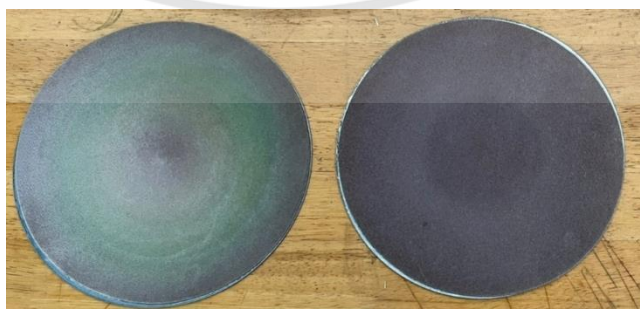
รูปที่ 3.29 เครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุนยี่ห้อ BUEHLER รุ่น METASERU250

3) ถ้าต้องการดูผิวชิ้นงาน ให้นำไปล้างด้วยเอทานอลและเป่าด้วยลมร้อน ก่อนที่จะนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อดูลักษณะของผิวเบื้องต้นว่าเรียงตามที่ต้องการหรือไม่



รูปที่ 3.30 กล้องจุลทรรศน์สำหรับส่องดูผิวชิ้นงานเบื้องต้น

4) เมื่อขัดผิวชิ้นงานจนถึงขนาด 4000 ก็ทำการขัดต่อด้วย diamond polishing paste ขนาด 6 และ 3 ไมโครเมตร ตามลำดับ ในรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 ผ้าขัด diamond polishing paste

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.32 ภาพระหว่างการขัด diamond polishing

5) เมื่อขัดชิ้นงานเสร็จเรียบร้อยแล้วก็นำชิ้นงานไปส่องกล้องจุลทรรศน์ เพื่อดูผิวชิ้นงานในแต่ละ conditions ที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการไฮเพอร์เซอร์ชัน เพื่อดูผิวว่าเรียบพอที่จะนำไปทดสอบการกัดกร่อนหรือไม่

ในการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแบบไฮเพอร์เซอร์ชัน จะนำไปทดสอบกับเครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า (Potentiostat/Galvanostat) รุ่น PGSTAT 302N ดังแสดงในรูปที่ 3.33 ซึ่งเป็นเครื่องที่ควบคุมศักย์และวัดกระแสไฟฟ้าจากปฏิกิริยาเคมี ซึ่งสามารถวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Voltammetry, Potentiometry และ Electrochemical Impedance Spectroscopy โดยการใช้งานเครื่องจะการป้อนกระแสไฟฟ้า หรือความต่างศักย์ไฟฟ้าให้แก่ตัวอย่างทดสอบ เพื่อเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า จากนั้นนำค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมาคำนวณหาอัตราการกัดกร่อน และค่าความต้านทานโพลาไรเซชัน เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลการทดสอบ



รูปที่ 3.33 แสดงชุดเครื่องมือการทดสอบการกัดกร่อนยี่ห้อ AUTOLAB รุ่น PGSTAT 302N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากโอริงบริเวณด้านบนที่วงกลมสีแดงของ Flat Cell Kit ดังรูปที่ 3.34 ของห้องทดลอง มีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานที่จะทำการทดสอบ จึงจำเป็นต้องออกแบบโอริงใหม่ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าขนาดของชิ้นงานทดสอบ โดยขนาดที่ออกแบบใหม่แสดงในรูปที่ 3.37



รูปที่ 3.34 แสดงบริเวณที่ใส่โอริงเพื่อวางชิ้นงาน



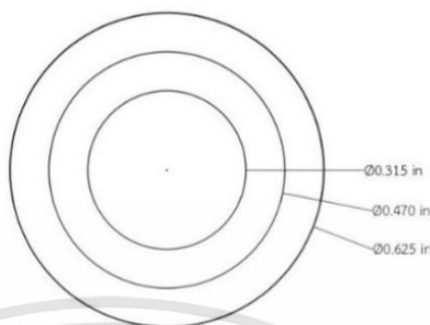
รูปที่ 3.35 แสดงตัวอย่างการวางชิ้นงานทดสอบบนโอริง



รูปที่ 3.36 แสดงชิ้นงานที่มีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของโอริง

จากรูปที่ 3.34 จะเห็นได้ว่าบริเวณที่วงกลมสีแดง เป็นบริเวณของโอริงที่ต้องวางชิ้นงานบนโอริงเพื่อให้ผิวของชิ้นงานสัมผัสกับสารละลายโดยชิ้นงานจะวางอยู่บนโอริง (O-ring) ที่แสดงในรูป 3.35 แต่เนื่องจากชิ้นงานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของโอริง ที่มีขนาด 11 มิลลิเมตร ทำให้ชิ้นงานตกลงไปด้านล่างจึงไม่สามารถทำการ

ทดลองได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำโอรังใหม่ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในเล็กกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน



รูปที่ 3.37 แบบร่างของโอรังขนาดใหญ่

การออกแบบโอรังใหม่ โดยวัสดุที่ใช้ทำโอรัง คือเทฟลอน (Teflon) เนื่องจากมีสมบัติในการต้านการกัดกร่อนของสารละลาย โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร หรือ 0.315 นิ้ว ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด 0.502 ตารางเซนติเมตร โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก เท่ากับ 0.625 นิ้ว และความสูงของฐานโอรัง เท่ากับ 0.059 นิ้ว เท่ากับของโอรังเดิม เนื่องจากต้องนำไปใส่ลงในช่องที่แสดงในรูป 3.34 ให้พอดี และในส่วนที่เป็นช่วงความชันไม่ได้จำกัดความสูง มีเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการทดลองสารละลายไหลออกมาจากการเกิดช่องว่างระหว่างชิ้นงานกับโอรัง ตัวอย่างการวางชิ้นงานดังที่แสดงในรูป 3.35 ซึ่งขนาดของพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่สัมผัสกับสารละลายไม่มีผลกับการทดสอบ แม้ว่าจะทำให้วัดค่ากระแสไฟฟ้าได้น้อยแต่สามารถเทียบบัญญัติไตรยางศ์ให้เป็นหน่วยแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลการทดสอบได้

ต่อไปจะเป็นการอธิบายขั้นตอนการกัดกร่อนด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

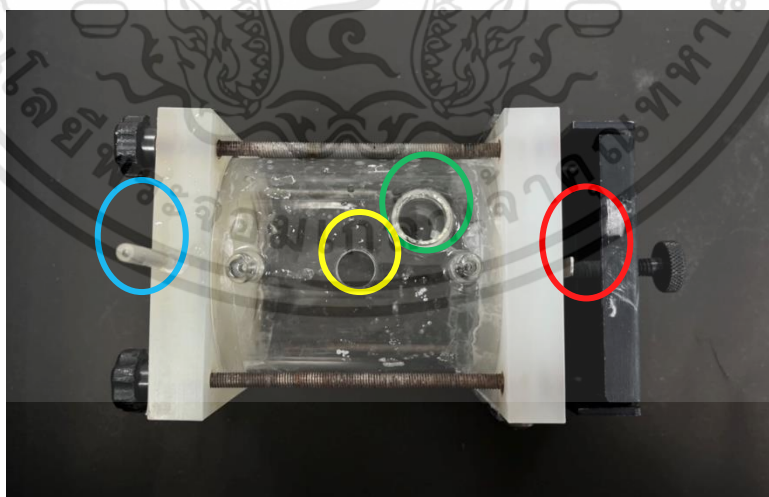
1) เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 3.5% โดยการผสมเกลือเคมี 35 กรัม ลงในน้ำปริมาณ 1000 มิลลิลิตร ดังแสดงในรูปที่ 3.38 โดยในการทดสอบจำนวน 6 conditions ใช้น้ำไปประมาณ 2000 มิลลิลิตร



รูปที่ 3.38 การชั่งตวงเกลือเคมี 35 กรัม เพื่อใช้เป็นสารละลายโซเดียมคลอไรด์

2) จากรูปที่ 3.39 ในวงกลมสีแดงคือบริเวณที่ใส่โอรังและวางชิ้นงานทดสอบบนโอรังอีกรอบหนึ่ง จากนั้นหมุนเกลียวลงมาปิดชิ้นงานให้แน่นพอสมควร เพื่อไม่ให้ชิ้นงานเลื่อนจากตำแหน่งเดิมขณะทำการทดสอบ และป้องกันสารละลายซึมออกมาด้วย

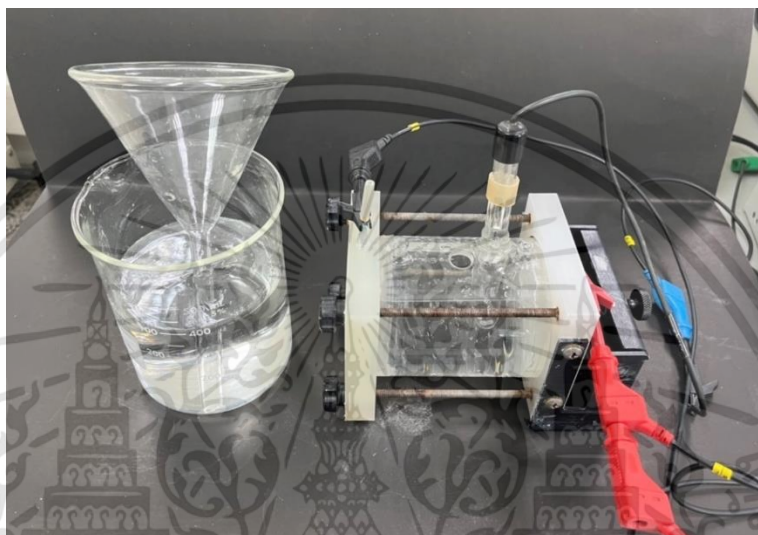
3) วาง Flat Cell Kit ลงบนนอน โดยในรูปที่ 3.39 ตรงวงกลมสีเขียวเราจะค่อย ๆ เติมน้ำที่ละน้อยลงไปก่อนเพื่อไล่อากาศที่ด้านใน และวงกลมสีเหลืองเราจะทำการเติมน้ำลงไปให้เกือบเต็มหรือให้โดนผิวชิ้นงานทั่วทั้งผิว



รูปที่ 3.39 Flat Cell Kit ที่ใส่สารละลายลงไป พร้อมกับหนีบขั้วเซลล์ไฟฟ้าและวางชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) จากนั้นทำการหนีบขั้วเซลล์ไฟฟ้าเคมี ตามในรูปที่ 3.39 วงกลมสีเขียวเราจะนำขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ชนิด SCE ใส่ลงในช่องที่เติมน้ำไปที่แรกจะสัมผัสกับสารละลาย จากนั้นหนีบขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode) บริเวณวงกลมสีแดงที่เชื่อมกับชิ้นงานโดยตรง ส่วนขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode) หนีบกับเสาบริเวณวงกลมสีฟ้า โดยในรูปที่ 3.40 จะแสดงการเตรียมอุปกรณ์ทั้งหมดที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว พร้อมทั้งจะทำการทดสอบการกัดกร่อน



รูปที่ 3.40 แสดงอุปกรณ์ที่พร้อมทำการทดสอบการกัดกร่อน

5) กดปุ่ม CELL ON ที่ตัวเครื่อง AUTOLAB จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าขึ้นมา 1 ค่า นั่นคือ ค่า voltage ในขณะที่กระแสไฟฟ้าของเครื่องยังคงเป็นศูนย์อยู่ หรือเรียกกันว่าค่า OCP (Open-circuit potential) ซึ่งสารละลายเริ่มทำปฏิกิริยากับชิ้นงานเราแล้ว ในรูปที่ 3.33

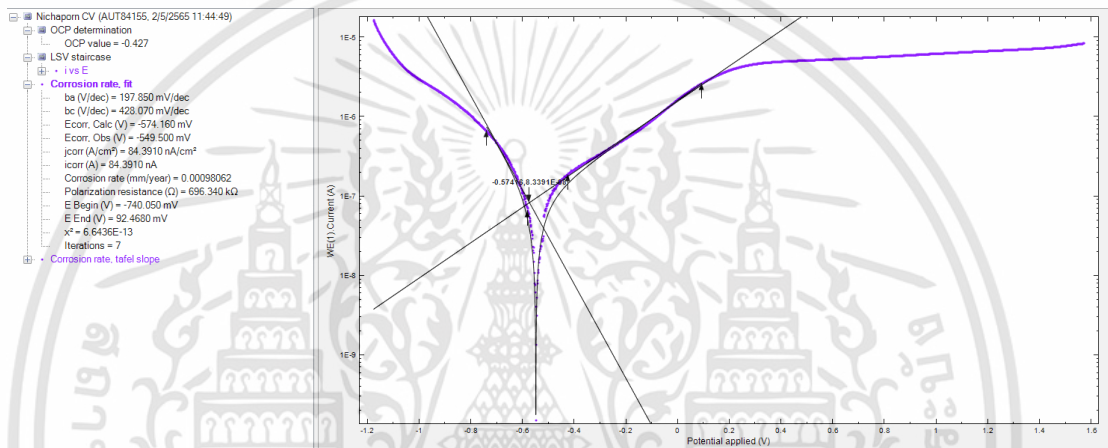
6) ทำการป้อนค่าหรือตัวแปรลงไปในคอมพิวเตอร์ ค่าที่เราป้อนเข้าไปคือ เวลา OCP และ ช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าตามความเหมาะสม ซึ่งเวลาที่เรाप้อนคือ 120 วินาที ส่วนค่าศักย์ไฟฟ้าเราจะอิงตามค่าที่ได้มาจากเครื่อง AUTOLAB ในตอนแรก เราใช้ช่วง -0.750 ถึง 2.000 โวลต์ โดยมีค่า scan rate อยู่ที่ 0.005 โวลต์ต่อวินาที

7) จากนั้นกด Start ที่หน้าจคอมพิวเตอร์เพื่อเป็นการเริ่มดำเนินการของการเริ่มดำเนินการของกราฟผลการทดสอบ โดยค่าศักย์ไฟฟ้าก็จะเริ่มกระบวนการตามค่าที่เราป้อนเข้าไป

8) ได้กราฟโพลาริเซชันออกมาจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ NOVA เวอร์ชัน 1.11.2 กราฟที่ได้มี 2 แบบ คือ Linear และ Logarithmic scale เพื่อนำไปวิเคราะห์และเปรียบเทียบ

เมื่อทำการทดสอบการกัดกร่อนเสร็จเรียบร้อยแล้วเราจะได้ผลการทดสอบที่เป็นกราฟโพลาริเซชันในรูปแบบของ Linear scale และ Logarithmic scale อยู่ในเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้โปรแกรม NOVA เวอร์ชัน 1.11.2 ซึ่งเราจะนำกราฟนั้นมาประเมินนอกช่วงทาเฟล (Tafel) อีกทีหนึ่งเพื่อให้ได้ค่าสำคัญต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณสมการและใช้ในการนำมาวิเคราะห์ผลในบทถัดไป ซึ่งขั้นตอนในการทำ Tafel slope นั้นจะใช้หลักการ Human error ดังต่อไปนี้

1) เราจะทำการเลือกจุด 2 จุดในเส้นกราฟฝั่งซ้ายและขวาอย่างละ 2 จุดเพื่อให้ได้ความชันในแต่ละเส้นกราฟ และจะมีจุดตัดกราฟเพียงจุดเดียวเท่านั้น ในรูปที่ 3.41



รูปที่ 3.41 แสดงการประเมินค่านอกช่วงทาเฟล หรือ Tafel slope

2) เมื่อทำการสร้างความชันกราฟขึ้นมาแล้ว โปรแกรมจะคำนวณค่าผลของการกัดกร่อนออกมาให้เลย เช่น ค่าอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate), ค่าความต้านทานโพลาริเซชัน (Polarization resistance) ดังแสดงในรูปที่ 3.42

ba (V/dec) (V/dec)	bc (V/dec) (V/dec)	Ecorr, Calc (V) (V)	Ecorr, Obs (V) (V)	j _{corr} (A/cm ²)	i _{corr} (A) (A)	Corrosion rate	Polarization resistance (Ω)	E Begin (V) (V)	E End (V) (V)
0.19785	0.42807	-0.57416	-0.5495	8.4391E-8	8.4391E-8	0.00098062	696340	-0.74005	0.092468

Signal	Expression	Unit

Density (g/cm ³)	7.86
Equivalent weight (g/mol)	27.925
Surface area (cm ²)	1
Number of significant digits	5
Reset	
Function	y = 8.4391E-08 * (e^(5.379*(x+0.5495))) - e^...

รูปที่ 3.42 แสดงค่าผลการทดสอบการกัดกร่อนที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) บริเวณช่องด้านข้างของรูปที่ 3.42 จะเห็นว่ามีค่าความหนาแน่น (Density) และค่าน้ำหนักสมมูล (Equivalent weight) โดยค่าเหล่านี้จะนำไปใช้ในการคำนวณค่าอัตราการกัดกร่อน และค่าความต้านทานโพลาไรเซชันตามสมการที่ 2.12 และ 2.15 ในบทที่ 2 ตามล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมการเสียรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

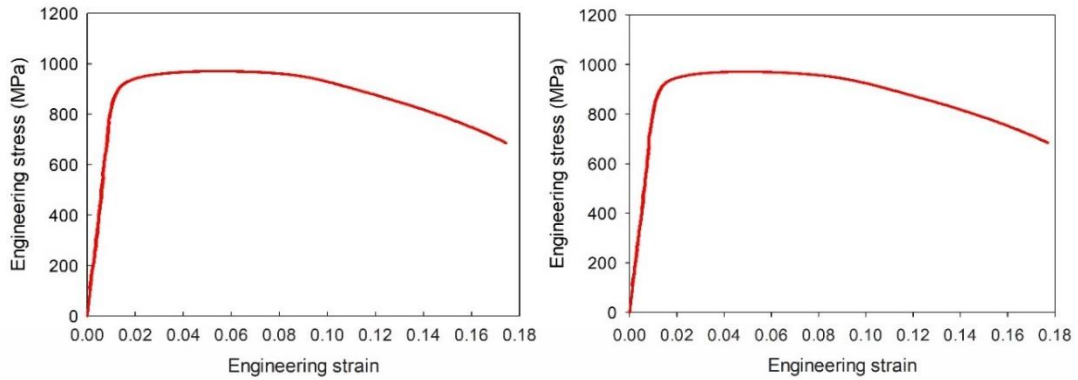
4.1.1 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานเพื่อหาสมบัติของวัสดุ

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบที่ใช้ในการหาค่าสมบัติของวัสดุเพื่อใช้ในการจำลองคอมพิวเตอร์ จากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานที่มีอัตราความเครียด (Strain rate) $4.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ของชิ้นงานทั้ง 2 ชิ้น จากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ย และนำค่าที่ได้จากการทดสอบใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดสมบัติเชิงกลของวัสดุในการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรม และความเค้นกับความเครียดจริง ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ ซึ่งจากกราฟพบว่าวัสดุแสดงพฤติกรรมการตอบสนองภายใต้แรงดึงที่กระทำตามรูปแบบวัสดุเหนียว คือ มีช่วงการเสียรูปถาวร (Plastic deformation) ที่เห็นได้ชัดในรูปที่ 4.1 ก่อนที่จะเกิดความเสียหายขึ้น โดยในตารางที่ 4.1 จะแสดงค่าความยืดหยุ่น (Modulus of elastic) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) ค่าความต้านแรง ณ จุดคราก (Yield stress, 0.2% offset) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percent elongation) ที่ได้จากการทดสอบ

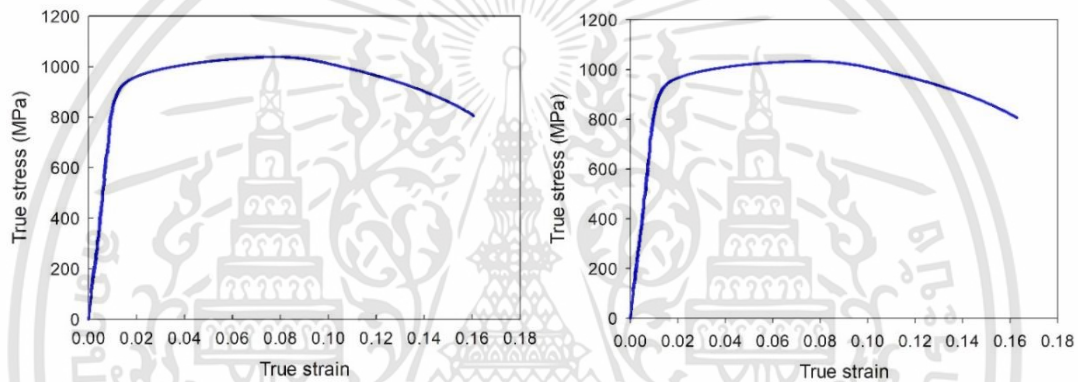


รูปที่ 4.1 ชิ้นงานเมื่อผ่านการทดสอบการดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดเชิงวิศวกรรมของชิ้นงานที่ 1 (ซ้าย) และชิ้นงานที่ 2 (ขวา)



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจริงของชิ้นงานที่ 1 (ซ้าย) และชิ้นงานที่ 2 (ขวา)

ตารางที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของวัสดุจากการทดสอบแรงดึง

สมบัติ	ชิ้นงานที่ 1	ชิ้นงานที่ 2	ค่าเฉลี่ย
Modulus of elasticity, E (GPa)	84.9	81.2	83.0
Ultimate tensile strength, UTS (MPa)	970.8	971.9	971.4
Yield stress (Offset 0.2%), σ_y	896.6	905.5	901.0
Percent elongation, δ (%)	17.6	17.9	17.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 Material Model

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของ Ti-6Al-4V ELI ในช่วงการเสียรูปถาวร (Plastic deformation) สามารถแสดงโดยสมการกฏยกกำลัง (Power law) ดังสมการที่ 4.2

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (4.2)$$

โดยที่ n คือ เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain hardening exponent) และ K คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรง (Strength coefficient) โดยทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริงจากช่วง Yield stress ถึง Ultimate Tensile strength ในมาตราส่วนลอการิทึมซึ่งจะได้ผลลัพธ์ที่เป็นเส้นตรง ซึ่ง n จะมีค่าเท่ากับความชันของเส้นตรง และ K คือค่าความเค้นจริง เมื่อความเครียดจริงมีค่าเท่ากับ 1 ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงผลของ Material Model

สมบัติ	ชิ้นงานที่ 1	ชิ้นงานที่ 2	ค่าเฉลี่ย
Strength coefficient, K	1280.77	1280.41	1280.59
Strain hardening exponent, n	0.075	0.073	0.074

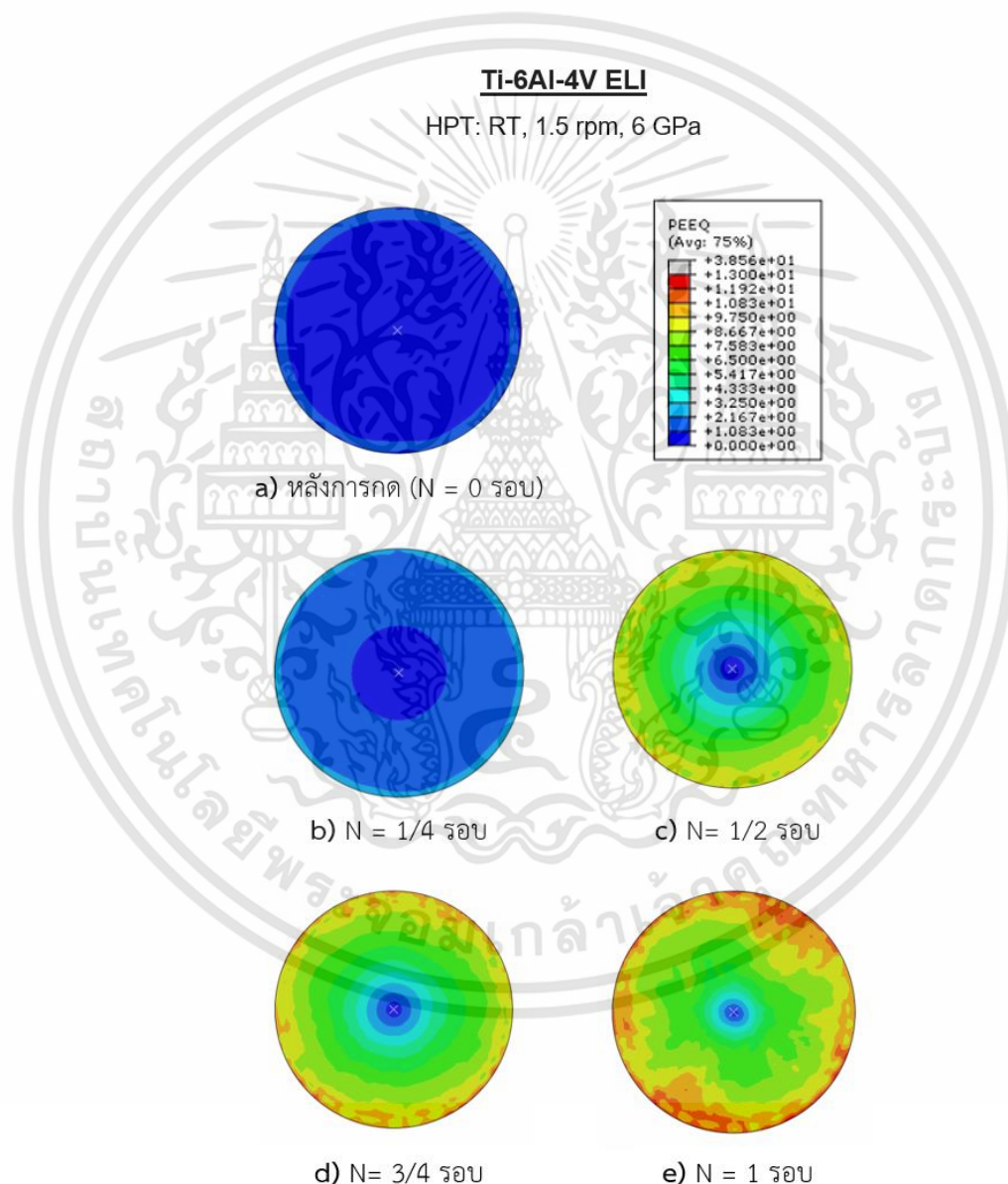
จะได้สมการ Material model ของ Ti-6Al-4V ELI ดังสมการที่ 4.3

$$\sigma = 1280.59\varepsilon^{0.074} \quad (4.3)$$

4.1.3 ค่า equivalent plastic strain ของชิ้นงานหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน

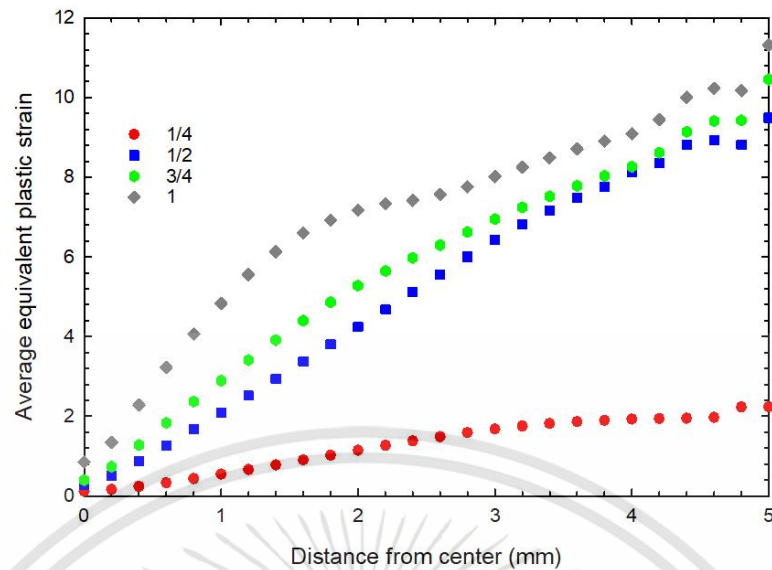
ผลการจำลองกระบวนการเสียรูปของชิ้นงานที่เงื่อนไขกึ่งจำกัดการไหล (Quasi-Constrain) ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผ่านโปรแกรม ABAQUS CAE ที่ผ่านกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันที่จำนวนรอบการหมุน 1 รอบ เนื่องจากในระหว่างการจำลองทางคอมพิวเตอร์เมื่อเพิ่มจำนวนรอบทำให้เกิดครีปที่ชิ้นงานมากขึ้น ส่งผลให้เอลิเมนต์มีความบิดเบี้ยวมากขึ้น จนกระทั่งการจำลองไม่สามารถดำเนินต่อไปได้ จึงทำการจำลองเพียง 1 รอบ เพื่อสังเกตความเปลี่ยนแปลงของ Equivalent plastic strain ที่กระทำต่อชิ้นงาน ที่ระยะทางจากจุดศูนย์กลางและจำนวนรอบที่แตกต่างกัน รวมถึงสังเกตความเป็นเนื้อเดียวกันของชิ้นงานเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น ซึ่งได้ผลการดังนี้

รูปที่ 4.4 a) ถึง e) แสดงผลการจำลองการกระจายของค่า Equivalent plastic strain บนชิ้นงาน Ti-6Al-4V ELI หลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันที่จำนวน 1 รอบ และรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Equivalent plastic strain เฉลี่ย กับระยะทางจากจุดศูนย์กลางทุกๆ 0.2 มิลลิเมตร ในจำนวนรอบการหมุนที่ 1/4, 1/2, 3/4 และ 1 รอบ จากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มรอบการหมุนจะส่งผลให้เกิดค่า Equivalent plastic strain ที่ขอบด้านนอกไล่เข้าสู่ศูนย์กลางของชิ้นงานจะมีค่าจากมากไปหาน้อย แสดงให้เห็นว่าค่า Equivalent plastic strain จะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรอบการหมุนและระยะทางจากจุดศูนย์กลางมากขึ้น



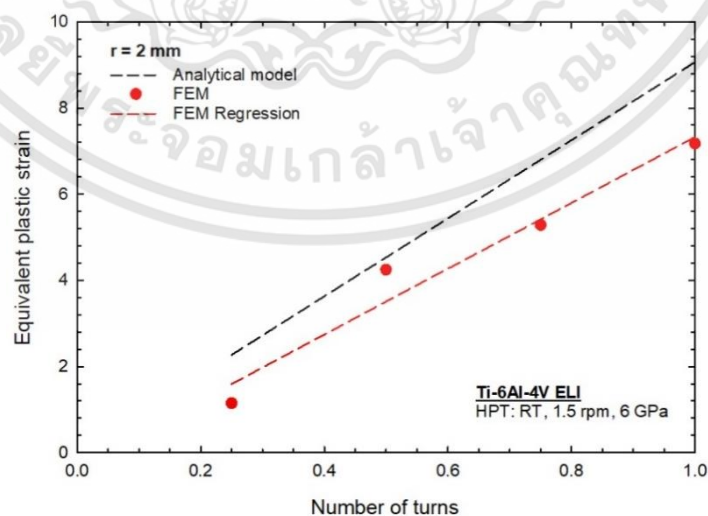
รูปที่ 4.4 แสดงค่า Equivalent plastic stain บนชิ้นงาน Ti-6Al-4V ELI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Equivalent plastic strain กับระยะห่างจากจุดศูนย์กลาง

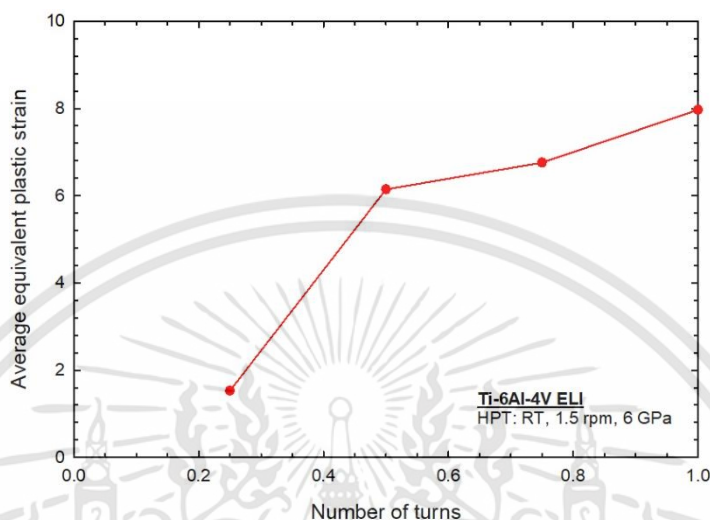
รูปที่ 4.6 แสดงค่า Equivalent plastic strain ที่ระยะห่างจากจุดศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ที่จำนวนรอบแตกต่างกัน พบว่าเมื่อจำนวนรอบการหมุนมากขึ้น ค่า Equivalent plastic strain จะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับสมการ Equivalent Von Mises strain แต่ค่าที่เกิดขึ้น มีค่าน้อยกว่าสมการ อาจมีผลอันเนื่องมาจากในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันนั้นมีการให้แรงดันในการกดชิ้นงาน ผลของแรงเสียดทาน หรือผลของความลาดเอียงของพื้นผิวด้านข้างของ anvil จากผลการศึกษาของ Pereira et al. [37] ซึ่งเป็นตัวแปรที่ไม่ได้นำมาคำนวณในสมการ



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Equivalent plastic strain กับจำนวนรอบการหมุน ที่ระยะห่างจากจุดศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 แสดงค่า Equivalent plastic strain เฉลี่ยบนพื้นผิวของชิ้นงานหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันที่จำนวนรอบการหมุนต่างกัน ได้แก่ 1/4, 1/2, 3/4 และ 1 รอบ แสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนรอบการหมุนเพิ่มขึ้นค่า Equivalent plastic strain จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Equivalent plastic strain เฉลี่ยบนพื้นผิวชิ้นงานกับจำนวนรอบการหมุน

นอกจากปริมาณการเสียรูปแล้ว ความเป็นเนื้อเดียวกันของชิ้นงานเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการนำไปใช้งาน โดยสามารถหาได้จากค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (Coefficient of variation, C.V.) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงค่าความกระจายตัวของข้อมูลแต่ละชุดแล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนที่น้อยจะแสดงถึงความกระจายตัวของข้อมูลที่น้อย หรือมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง โดยค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.4

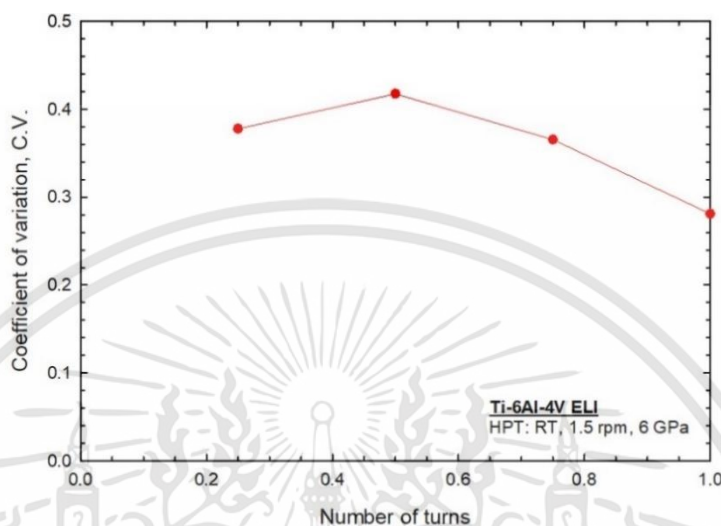
$$C.V. = \frac{S}{\bar{X}} \quad (4.4)$$

เมื่อ S คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ \bar{X} คือ ค่าเฉลี่ยประชากรข้อมูลทั้งหมด

รูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนของค่า Equivalent plastic strain เฉลี่ยบนพื้นผิวของชิ้นงานหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันที่จำนวนรอบการหมุนต่างกัน ได้แก่ 1/4, 1/2, 3/4 และ 1 รอบ จะเห็นว่า ค่า C.V. มีค่าสูงสุดที่จำนวนรอบที่ 1/2 รอบ ซึ่งมีค่ามากกว่าจำนวนรอบที่ 1/4 รอบ หมายความว่ารอบที่ 1/4 มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่ารอบที่ 1/2 เนื่องจากเกิดการเสียรูปเพียงเล็กน้อยจากชิ้นงานเดิมซึ่งมีความเป็นเนื้อเดียวกันมาก สามารถสังเกตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 ทำให้เกิดความแตกต่างของ Equivalent plastic strain ไม่มากนัก และหลังจากนั้นค่า C.V. มีแนวโน้มที่ลดลงแสดงให้เห็นว่า Equivalent plastic stain ของชิ้นงานมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นเมื่อจำนวนรอบการหมุนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันของ Equivalent plastic strain เฉลี่ย กับจำนวนรอบการหมุน

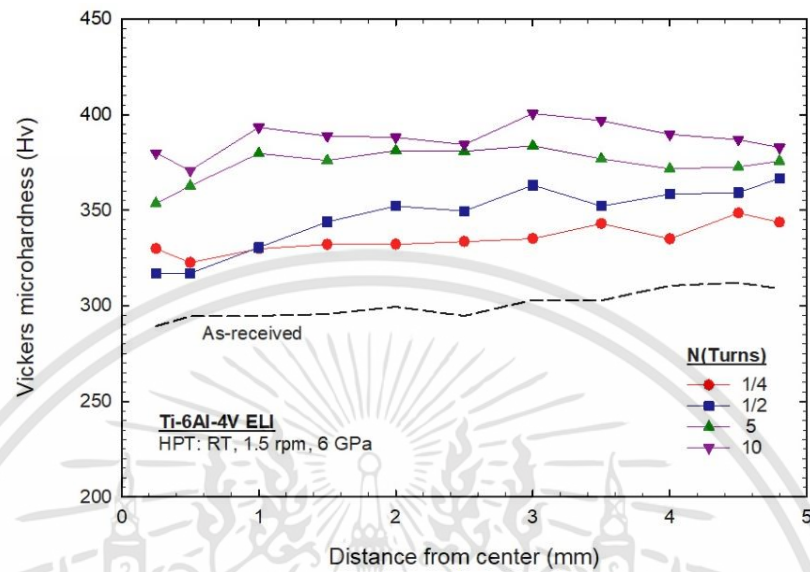
4.2 ผลของการทดสอบความแข็งแบบจุลภาค

4.2.1 ค่าความแข็งแบบจุลภาคเฉลี่ยตามแนวรัศมี

จากการวัดค่าความแข็งแบบจุลภาคในแนวรัศมีจากบริเวณจุดศูนย์กลางของชิ้นงานจำนวนทั้งหมด 4 เส้น ที่จำนวนรอบการหมุนที่ต่างกัน เมื่อความดันคงที่ แล้วนำมาเฉลี่ยตามระยะห่างจากจุดศูนย์กลาง ดังรูปที่ 4.9 พบค่าความแข็งแบบจุลภาคของชิ้นงานหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบการหมุนที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงจุดที่ค่าความแข็งแบบจุลภาคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอัตราที่น้อยลงที่จำนวนรอบการหมุน 10 รอบ และพบว่าค่าความแข็งแบบจุลภาคจะแปรผันกับระยะห่างจากบริเวณจุดศูนย์กลางของชิ้นงาน ที่บริเวณใกล้จุดศูนย์กลางจะมีค่าความแข็งแบบจุลภาคน้อยกว่าบริเวณขอบ โดยเฉพาะหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันจำนวนรอบต่ำ ๆ ที่ 1/4 และ 1/2 รอบ แต่การแปรผันตามแนวรัศมีจะมีค่าลดลงเมื่อมีจำนวนรอบการหมุนที่เพิ่มขึ้น ดังเช่นรอบการหมุนที่ 5 และ 10 รอบ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มจำนวนรอบการหมุนเพิ่มจนถึง 10 รอบ ค่าความแข็งแบบจุลภาคที่บริเวณจุดศูนย์กลางและขอบของชิ้นงานเริ่มมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจากผลที่กล่าวมานั้นมีแนวโน้มของค่าความแข็งแบบจุลภาคหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ Ying Chun Wang และ Terence G. Langdon [38] ที่แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจุลภาคหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันเมื่อมีจำนวนรอบการหมุนที่มากขึ้น ในที่สุดค่าความแข็งจะเริ่มเข้าสู่จุดอิ่มตัวและมีค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันตลอดทั้งชิ้นงาน



รูปที่ 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแบบจุลภาค (Microhardness) เทียบกับระยะทางจากบริเวณจุดศูนย์กลางชิ้นงาน ที่จำนวนรอบการหมุนที่ต่างกัน

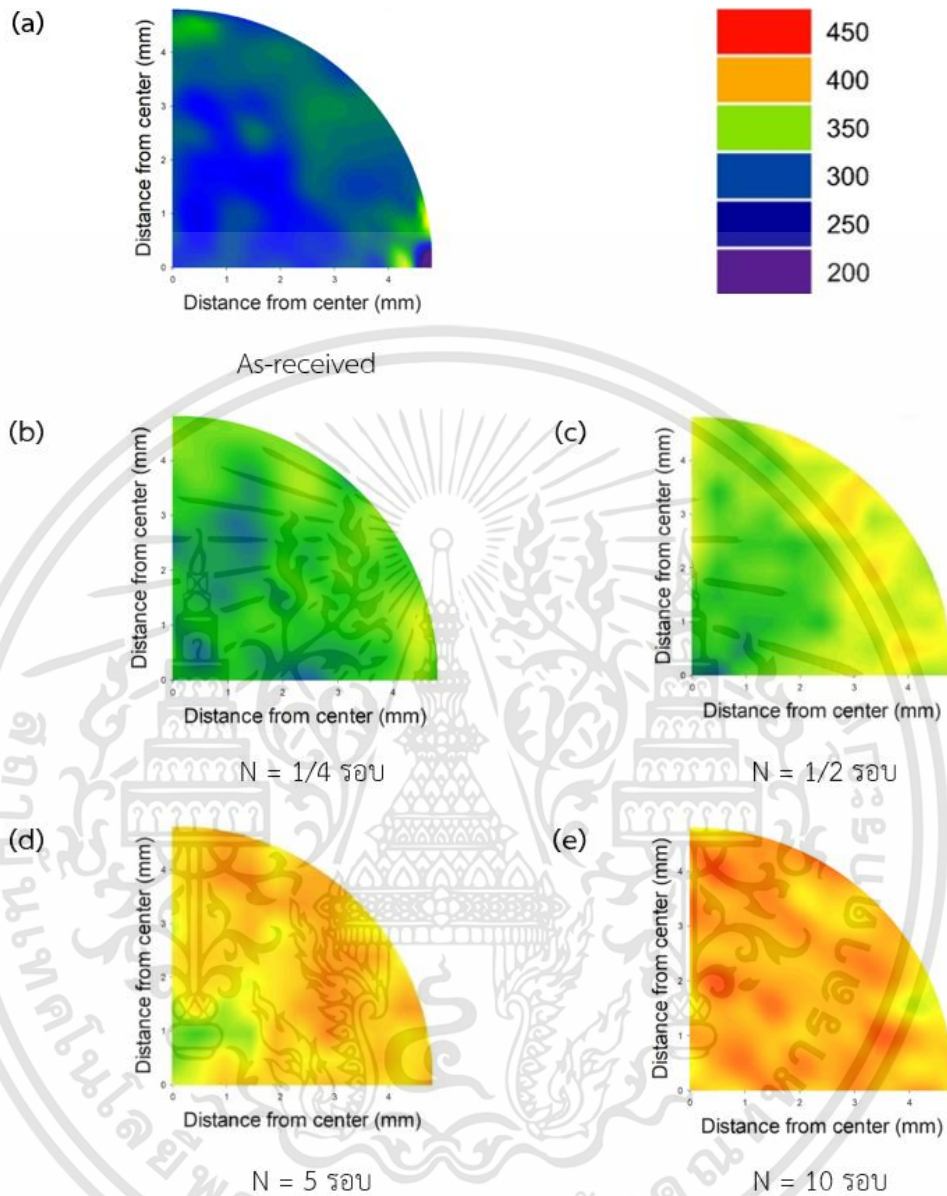
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การกระจายความแข็งระดับจุลภาคบนพื้นผิว

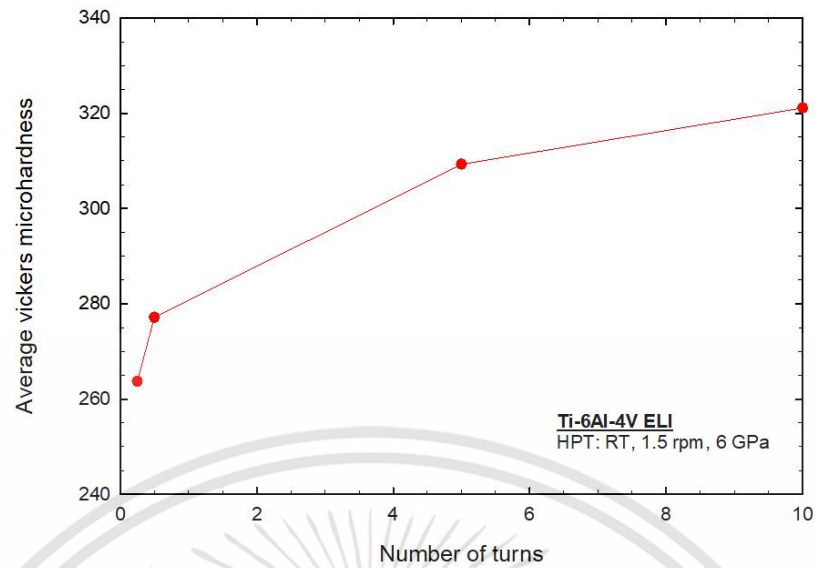
ผลการกระจายของค่าความแข็งแบบจุลภาคบนพื้นผิวของชิ้นงานก่อนและหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันที่มีเงื่อนไขของจำนวนรอบการหมุนที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดยกำหนดให้สีต่าง ๆ แสดงถึงช่วงของค่าความแข็งแบบจุลภาคที่แตกต่างกัน จากการสังเกตพบว่าที่จำนวนรอบการหมุนที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าความแข็งแบบจุลภาคที่สูงขึ้นและมีความสม่ำเสมอของสีที่เพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งที่จำนวนรอบการหมุน 10 รอบ มีช่วงสีที่ค่าความแข็งแบบจุลภาคมากที่สุดและค่อนข้างมีความสม่ำเสมอ แสดงให้เห็นว่าความแข็งแบบจุลภาคของชิ้นงานที่ตำแหน่งต่าง ๆ นั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งบ่งบอกถึงความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) ของชิ้นงาน ดังนั้นจึงนำค่าความแข็งแบบจุลภาคบนพื้นผิวของชิ้นงานมาเฉลี่ยเพื่อดูแนวโน้มของค่าความแข็งหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันในแต่ละรอบการหมุน ดังรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นค่าความแข็งแบบจุลภาคเฉลี่ยบนพื้นผิวของชิ้นงานในควอเตอร์ที่ 1 ที่จำนวนรอบการหมุนที่ต่างกัน เมื่อความดันคงที่ ค่าความแข็งแบบจุลภาคหลังผ่านกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันที่รอบการหมุน 1/2, 1/4, 5 และ 10 รอบ มีค่าเท่ากับ 263.71, 277.13, 309.31 และ 321.10 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าในช่วงรอบการหมุน 1/4 และ 1/2 รอบ ค่าความแข็งแบบจุลภาคมีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และมีการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งแบบจุลภาคในอัตราที่ช้าลงในรอบการหมุนที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มรอบการหมุนจนถึงรอบที่ 10 จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งแบบจุลภาคเริ่มเข้าสู่จุดอิ่มตัว ทำให้มีอัตราการเพิ่มของค่าความแข็งแบบจุลภาคที่ช้าลงและเริ่มไม่เปลี่ยนแปลง และทำการวิเคราะห์ความเป็นเนื้อเดียวกันของชิ้นงานด้วยค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันของค่าความแข็งแบบจุลภาคจากสมการ 4.4 ที่จำนวนรอบการหมุนต่างกัน เมื่อความดันคงที่ ดังรูปที่ 4.12 ได้แก่ 1/4, 1/2, 5 และ 10 รอบ ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนเท่ากับ 0.028, 0.056, 0.049 และ 0.035 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่รอบการหมุน 1/4 รอบ ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนมีค่าที่น้อยแล้วเพิ่มขึ้นที่รอบการหมุน 1/2 รอบ และเมื่อรอบการหมุนเพิ่มขึ้นถึง 5 และ 10 รอบ ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแสดงถึงความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) ของชิ้นงานที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อจำนวนรอบการหมุนเพิ่มมากขึ้นด้วย

Ti-6Al-4V ELI

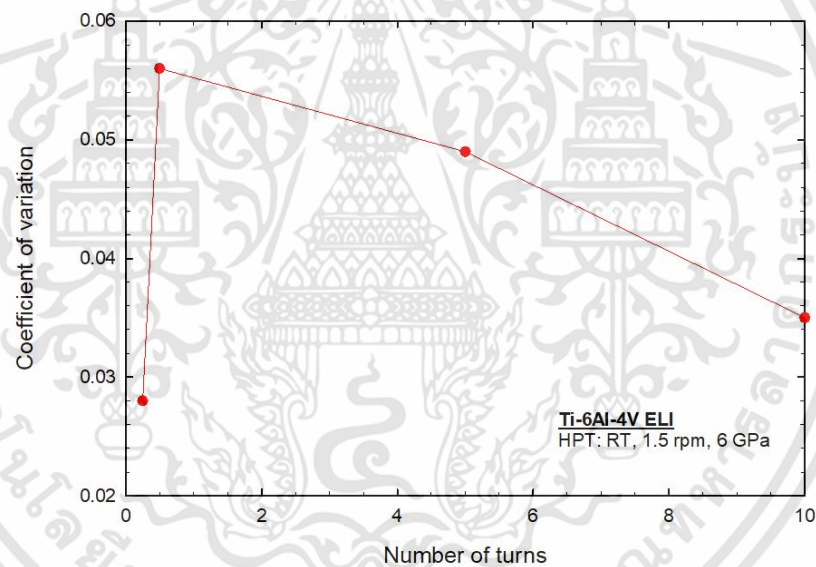
HPT: RT, 1.5 rpm, 6 GPa



รูปที่ 4.10 (a) ถึง (e) แสดงภาพคอนทัวร์ความแข็งแบบจุดภาคบริเวณควอดแรนต์ที่ 1 ที่จำนวนรอบการหมุนที่ต่างกัน



รูปที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแบบจุลภาคเฉลี่ยกับจำนวนรอบการหมุน



รูปที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันของค่าความแข็งแบบจุลภาคกับจำนวนรอบการหมุน

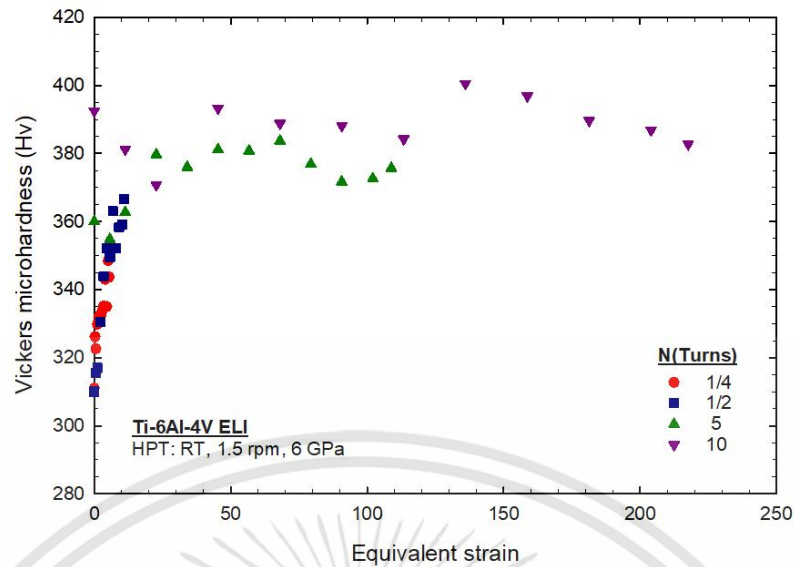
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบความแข็งแรงแบบจุลภาคในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่าที่จำนวนรอบการหมุนเพิ่มขึ้นค่าความแข็งแรงก็เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่า Equivalent strain ที่วิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังนั้นจึงทำการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงแบบจุลภาคและ Equivalent strain ของชิ้นงานหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน จากสมการที่ 2.6 ที่จำนวนรอบการหมุนต่างกัน เมื่อความดันคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าที่จำนวนรอบการหมุน 1/4 และ 1/2 รอบ มีค่าความแข็งแรงแบบจุลภาคและ Equivalent strain ที่ค่อนข้างน้อย แต่เมื่อจำนวนรอบการหมุนเพิ่มขึ้นจนถึง 5 และ 10 รอบ ค่าความแข็งแรงแบบจุลภาคเพิ่มขึ้น รวมทั้งค่า Equivalent strain ก็มีการเพิ่มขึ้นอย่างมากด้วยเช่นเดียวกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าทั้งสองชนิดมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันเมื่อจำนวนรอบการหมุนเพิ่มมากขึ้น จึงได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงแบบจุลภาคกับ Equivalent strain ด้วยกระบวนการ Nonlinear regression และลอการิทึม ทำให้ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมธรรมชาติของค่าความแข็งแรงแบบจุลภาคและลอการิทึมธรรมชาติของ Equivalent strain ดังแสดงในรูปที่ 4.14 รวมทั้งสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงแบบจุลภาคและค่า Equivalent strain ดังสมการที่ 4.6 ที่มีค่า R-squared (R^2) เท่ากับ 0.87 ซึ่งบ่งบอกว่าสมการนี้ค่อนข้างมีความแม่นยำในการนำไปใช้คาดการณ์

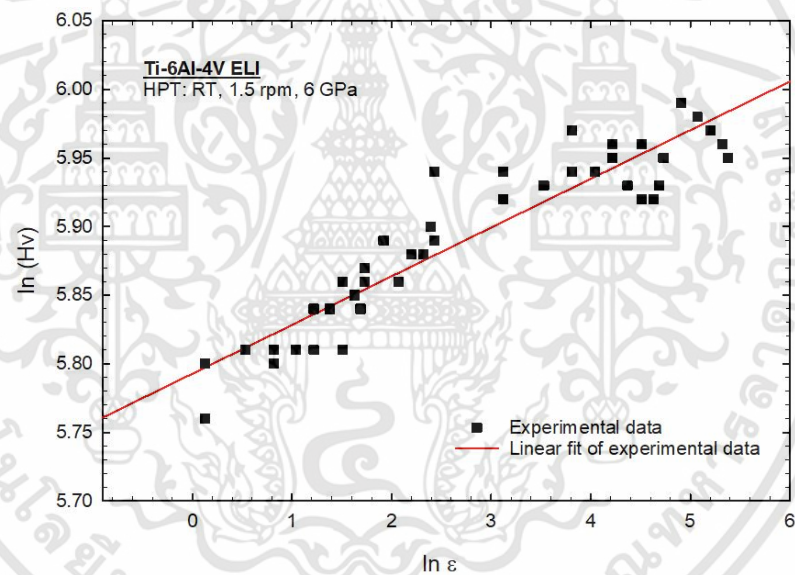
$$Hv = 329.38\varepsilon^{0.034} \quad (4.6)$$

เมื่อ Hv คือ ค่าความแข็งแรงแบบจุลภาค และ ε คือ Equivalent strain

เลขชี้กำลังของ Equivalent strain ในสมการที่ 4.6 แสดงถึงความสามารถในการชุบแข็ง (Hardenability) ของวัสดุ ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับการศึกษาของ Ying Chun Wang และ Terence G. Langdon ที่ได้ทำการศึกษาว่าความสามารถในการชุบแข็งเกิดจากผลของการลดขนาดของเกรน (Grain refinement) และการเปลี่ยนแปลงเฟสของวัสดุ และการที่วัสดุมีความสามารถในการชุบแข็งที่ต่างกันนั้น เนื่องมาจากความแตกต่างกันของโครงสร้างระดับจุลภาค (Microstructure) ของวัสดุ ตั้งแต่ชิ้นงานเริ่มต้นก่อนกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน [38]



รูปที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแบบจุลภาคกับ Equivalent strain



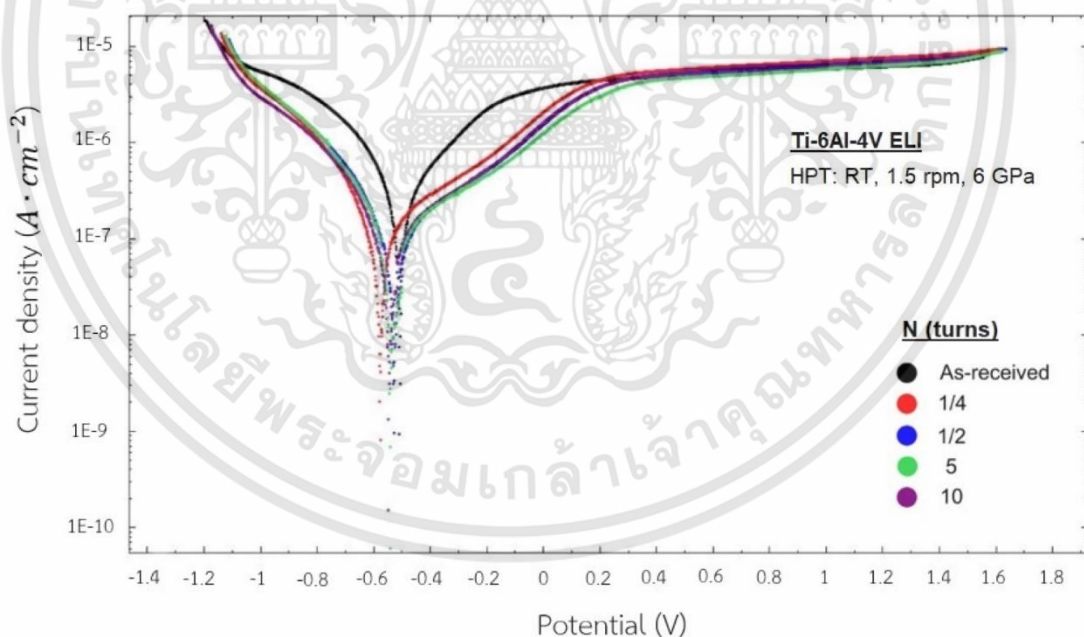
รูปที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมธรรมชาติของค่าความแข็งแบบจุลภาค และลอการิทึมธรรมชาติของ Equivalent strain ของชิ้นงานหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลของการทดสอบการกัดกร่อน

การทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงาน Ti-6Al-4V ELI ด้วยหลักการทางเคมีไฟฟ้า โดยการวิเคราะห์ผลจากกราฟโพลาริเซชันเพื่อแสดงสมบัติของการกัดกร่อนของชิ้นงาน ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl 3.5%) ผลลัพธ์ทั้งหมดสำหรับชิ้นงานก่อนและหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน ในแต่ละจำนวนรอบที่แตกต่างกัน โดยค่าที่ได้จากการประมาณค่านอกช่วงจากทาเฟล (Tafel) ดังแสดงในตารางที่ 4.3

รูปที่ 4.16 แสดงกราฟโพลาริเซชันส่วนของ แคโทดิก แอคทีฟ พาสซีฟและทรานพาสซีฟของชิ้นงานที่ก่อนและหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน โดยกราฟแสดงให้เห็นถึงการกัดกร่อนแบบพาสซีฟที่คล้ายคลึงกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ และตารางที่ 4.3 แสดงค่าสำคัญที่ได้จากเส้นโค้งโพลาริเซชัน ประกอบด้วย ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}), ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}), ค่าความชันเส้นกราฟแอโนดิก (b_a), ค่าความชันเส้นกราฟแคโทดิก (b_c), ค่าความต้านทานโพลาริเซชัน (R_p) และอัตราการกัดกร่อน (CR) ตามลำดับ ของแต่ละชิ้นงานที่ทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl 3.5%) ที่อุณหภูมิห้อง

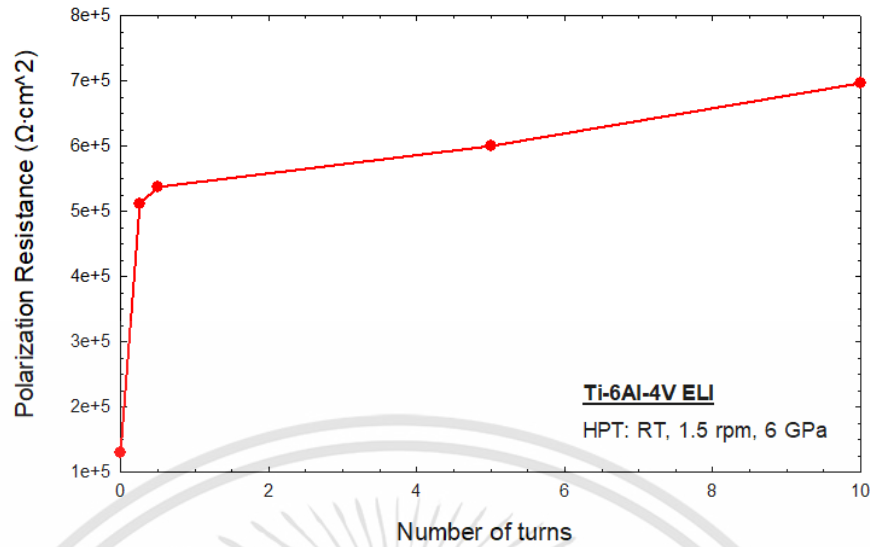


รูปที่ 4.15 เส้นโค้งโพลาริเซชันของชิ้นงานทดสอบในแต่ละเงื่อนไขในสารละลายโซเดียมคลอไรด์

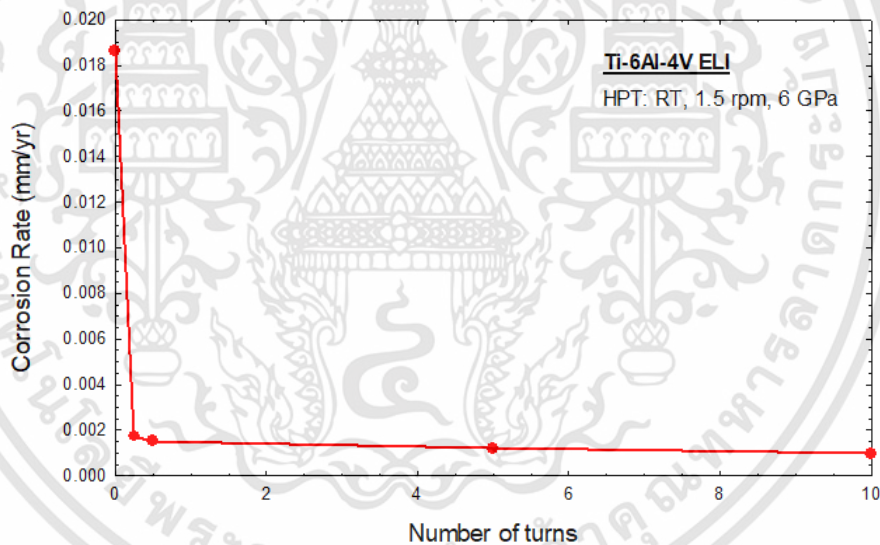
หลังจากทดสอบการกัดกร่อน ชิ้นงานก่อนกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน มีค่าอัตราการกัดกร่อน (CR) มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานทั้งหมด ในทางกลับกันชิ้นงานหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน มีค่าความต้านทานโพลาริเซชัน (R_p) เพิ่มขึ้นตามลำดับจำนวนรอบการหมุน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ค่า CR และค่า R_p สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.12 ถึง 2.15 ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับ i_{corr} รวมไปถึงการเพิ่มขึ้นของศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน E_{corr} จากรูปที่ 4.15 เส้นโค้งโพลาริเซชันของชิ้นงานโลหะผสมไทเทเนียม Ti-6Al-4V ELI ก่อนและหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนเลยว่ามีพฤติกรรมการกัดกร่อนแบบพาสซีฟที่คล้ายคลึงกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ NaCl 3.5% ยกเว้นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) ที่สังเกตได้จากชิ้นงานหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน แล้วจะมีค่าสูงกว่าชิ้นงานก่อนกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันไม่มากเท่าไร นอกจากนี้ยังเห็นได้ชัดอีกว่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Potential) ของชิ้นงานหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน มีค่าติดลบมากกว่าชิ้นงานก่อนกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน โดยความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนได้รับการประเมินค่านอกช่วงทาเฟล หรือเรียกว่า Tafel slope จากเส้นโค้งโพลาริเซชัน ดังนั้น ค่าอัตราการกัดกร่อน (CR) และค่าความต้านทานโพลาริเซชัน (R_p) จึงถูกแสดงไว้ดังตารางที่ 4.3 นอกจากนั้นการประเมินค่านอกช่วงทาเฟล ยังแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความชันเส้นกราฟแอนอดิก (b_a) และค่าสัมประสิทธิ์ความชันเส้นกราฟแคโทดิก (b_c) ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความต้านทานโพลาริเซชัน (R_p) ตามสมการที่ 2.15 และยังเป็นตัวแปรที่แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของเส้นโค้งโพลาริเซชันในการกัดกร่อนแบบพาสซีฟ ดังนั้น ชิ้นงานหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันมีค่า R_p มากกว่าชิ้นงานก่อนกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันตามจำนวนรอบการหมุน แสดงให้เห็นถึงความต้านทานการกัดกร่อนของวัสดุที่ดีขึ้น เนื่องจากการเพิ่มจำนวนรอบการหมุนของกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน ทำให้ขนาดเกรนละเอียดขึ้นส่งผลต่อความแข็งแรงของวัสดุด้วยเช่นกัน

นำค่าความต้านทานโพลาริเซชัน (R_p) และค่าอัตราการกัดกร่อน (CR) ตามตารางที่ 4.3 ซึ่งได้มาจากการทดลองการกัดกร่อน มาสร้างกราฟเชิงเส้นจำนวน 2 กราฟ เพื่อเปรียบเทียบค่าทั้งสองกับจำนวนรอบที่ต่างกันทั้งก่อนและหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 และทำการวิเคราะห์ผล



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานโพลาไรเซชันกับจำนวนรอบการหมุน



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับจำนวนรอบการหมุน

จากกราฟเส้นตรงเปรียบเทียบค่าความต้านทานโพลาไรเซชัน (Polarization resistance, R_p) กับจำนวนรอบการหมุน ในรูปที่ 4.16 โดยค่า R_p ก่อนกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันหรือที่จำนวน 0 รอบนั้นมีค่า R_p เท่ากับ $128990 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ซึ่งเป็นค่าน้อยที่สุดจากชิ้นงานจำนวนรอบอื่น และพอที่จำนวนรอบการหมุนที่ 1/4 รอบซึ่งเป็นชิ้นงานหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันแล้วนั้น จะสังเกตเห็นว่าค่า R_p เพิ่มขึ้นมากอย่างเห็นได้ชัด และแนวโน้มของค่า R_p ยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงสิ้นสุดที่จำนวนรอบที่ 10 รอบ ซึ่งมีค่า R_p เท่ากับ $696340 \Omega \cdot \text{cm}^2$ แสดงให้เห็นถึงความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

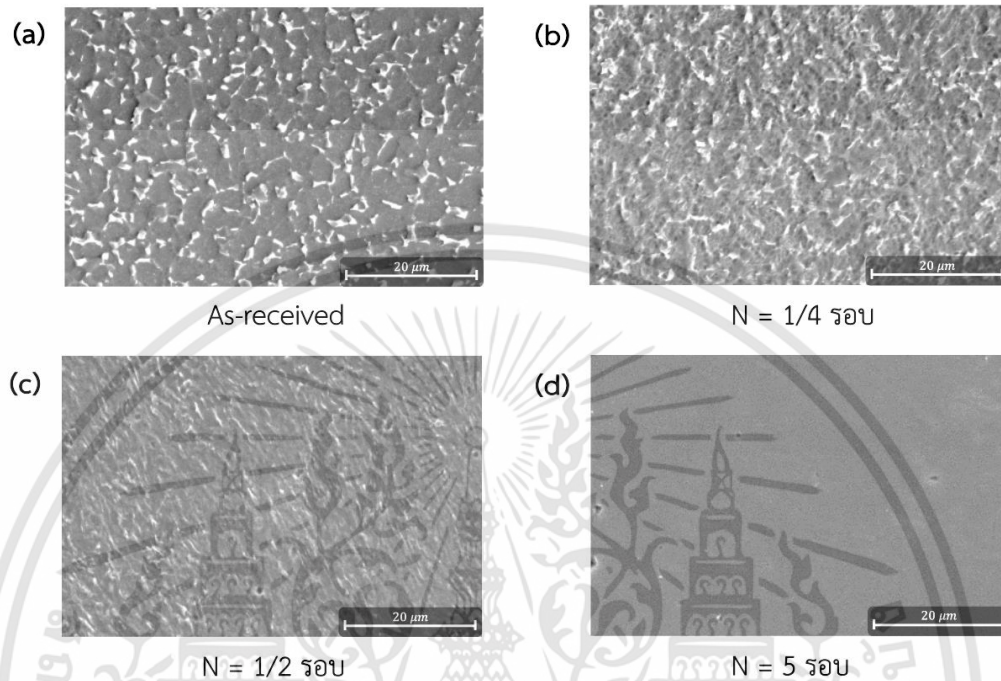
การกัดกร่อนที่ดีขึ้นมากอย่างต่อเนื่องจากชิ้นงานก่อนกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันมีความต้านทานที่น้อยมากเมื่อเทียบกับชิ้นงานหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน และเมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate, CR) กับจำนวนรอบการหมุน ในรูปที่ 4.17 โดยค่า CR ก่อนกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันหรือที่จำนวนรอบที่ 0 รอบนั้นมีค่า $CR = 0.018604$ mm/yr ซึ่งเป็นค่ามากที่สุดจากชิ้นงานจำนวนรอบอื่น ในขณะที่จำนวนรอบการหมุนที่ 1/4 รอบเป็นชิ้นงานหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันแล้วนั้นจะสังเกตเห็นว่าค่า CR ลดลงอย่างเห็นได้ชัด และแนวโน้มของค่า CR ยังคงลดลงเรื่อย ๆ จนไปถึงสิ้นสุดที่จำนวนรอบที่ 10 รอบ ซึ่งมีค่า CR เท่ากับ 0.0009806 mm/yr แสดงให้เห็นถึงอัตราการกัดกร่อนที่กระทำต่อชิ้นงานนั้นลดลงอย่างต่อเนื่องจากชิ้นงานก่อนกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันที่อัตราการกัดกร่อนสูงมากเมื่อเทียบกับชิ้นงานหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน ซึ่งเป็นผลดีต่อชิ้นงาน และเป็นไปตามข้อสรุปงานวิจัยของ Lage, M.D.A., et al. [39] ที่ว่าเมื่อจำนวนรอบการหมุนของชิ้นงานหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันยิ่งมากขึ้น จะส่งผลให้ขนาดเกรนของโครงสร้างระดับจุลภาคของชิ้นงานนั้นเล็กและละเอียดมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้วัสดุมีความต้านทานการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นด้วย

การลดขนาดเกรน (Grain refinement) โดยกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันอ้างอิงจาก Nie, M., et al. [20] ต่อความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานโลหะผสมไทเทเนียมชนิด Ti-6Al-4V ELI มีผลกระทบต่อสมบัติของวัสดุนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างระดับจุลภาคของผิววัสดุ โดยการทดสอบทางเคมีไฟฟ้าที่นั่น แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการลดขนาดของเกรนมีผลต่อความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ NaCl 3.5% ซึ่งความต้านทานการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน และการลดขนาดเกรนยังช่วยเพิ่มปฏิกิริยาบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันและปรับปรุงประสิทธิภาพการกัดกร่อนโดยการสร้างฟิล์มแบบพาสซีฟขึ้นมาปกป้องผิวอย่างรวดเร็ว ผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นว่าการลดขนาดของเกรนที่โครงสร้างระดับจุลภาคมีประสิทธิภาพต่อความต้านทานการกัดกร่อน

เนื่องจากขนาดเกรน (Grain size) เป็นตัวแปรสำคัญของโครงสร้างที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุ เมื่อเกรนมีขนาดลดลงจะส่งผลให้วัสดุมีสมบัติที่ดีขึ้น ดังความสัมพันธ์ของ Hall-Petch ที่เคยกล่าวมาข้างต้นในสมการที่ 2.1 และจากการทดสอบที่ผ่านมาแสดงให้เห็นถึงสมบัติที่ดีขึ้นของวัสดุอันเนื่องมาจากจำนวนรอบการหมุนที่เพิ่มมากขึ้น จึงมีการถ่ายภาพชิ้นงานก่อนและหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ที่ระดับ 20 ไมโครเมตร บริเวณขอบของชิ้นงาน เพื่อสังเกตลักษณะของขนาดเกรนที่บริเวณพื้นผิว ดังรูปที่ 4.18 พบว่า ก่อนกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันเกรนมีขนาดใหญ่ แต่หลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันเมื่อจำนวนรอบการหมุนเพิ่มขึ้นขนาดเกรนก็จะลดลงตามไปด้วย จึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปได้ว่ากระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันนั้นเป็นกระบวนการที่ทำให้วัสดุมีขนาดเกรนลดลงซึ่งส่งผลให้สมบัติของวัสดุ ทั้งด้านความแข็งและความต้านทานการกัดกร่อนถูกพัฒนาให้ดีขึ้นด้วย



รูปที่ 4.18 (a) ถึง (d) แสดงภาพถ่ายโครงสร้างพื้นผิวก่อนและหลังผ่านกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันที่ระดับ 20 ไมโครเมตร บริเวณขอบของชิ้นงาน

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าสำคัญที่ได้จากเส้นโค้งโพลาร์ที่มาจากกริดกรอนจินงานในแต่ละ conditions ที่จำนวนรอบ = 0, 1/4, 1/2, 5 และ 10 รอบ

จำนวนรอบ (Conditions)	E_{corr} (mV)	i_{corr} (A/cm ²)	b_a (mV/decade)	b_c (mV/decade)	R_p ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CR (mm/yr)
N = 0	-0.55046	1.5926×10^{-6}	0.73671	1.33832	1.2889×10^5	0.018604
N = 1/4	-0.62473	1.1487×10^{-7}	0.17699	0.46389	5.1111×10^5	0.0017390
N = 1/2	-0.57429	9.3352×10^{-8}	0.18555	0.43284	5.3694×10^5	0.0015171
N = 5	-0.56098	1.0321×10^{-7}	0.20023	0.49676	6.0047×10^5	0.0011993
N = 10	-0.57416	8.4391×10^{-8}	0.19875	0.42807	6.9634×10^5	0.0009806

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยเรื่องพฤติกรรมการเสียรูปและสมบัติวัสดุของโลหะผสม Ti-6Al-4V ELI หลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน ในการศึกษาครั้งนี้ได้แบ่งการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันออกเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ และการทดสอบกับชิ้นงานจริง ได้แก่ การทดสอบความแข็ง และการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

การทดสอบแรงดึงของชิ้นงานเพื่อหาสมบัติเชิงกลของวัสดุ Ti-6Al-4V ELI โดยใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบของ 2 ชิ้นงาน พบว่าได้ค่า Modulus of Elastic, $E = 83.0$ GPa, Ultimate Tensile Strength, $UTS = 971.4$ MPa, Yield stress, $\sigma = 901.0$ MPa, Percent Elongation, $\epsilon = 17.7\%$ และ Material Model ของวัสดุ $\sigma = 1280.59e^{0.074}$ ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์การเสียรูปของวัสดุด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ จากการจำลองกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าผลของการทดสอบ Equivalent Plastic Strain ของชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบการหมุน และ Equivalent Plastic Strain ที่บริเวณขอบสูงกว่าบริเวณจุดศูนย์กลาง ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับแบบจำลองที่คำนวณจากความสัมพันธ์ของสมการ Equivalent Von Mises Strain

สำหรับการทดลองหลังจากกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน โดยการทดสอบค่าความแข็งแบบจุลภาคตามแนวรัศมี พบว่าเมื่อจำนวนรอบการหมุนเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแบบจุลภาคจะเพิ่มขึ้นด้วย จนถึงจุดที่เริ่มอิ่มตัวค่าความแข็งแบบจุลภาคจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้าลง และเริ่มมีค่าใกล้เคียงกันตลอดทั้งชิ้นงาน ในส่วนของการกระจายความแข็งที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนผิวของชิ้นงาน พบว่าเมื่อจำนวนรอบการหมุนเพิ่มขึ้น ชิ้นงานจะมีค่าความแข็งแบบจุลภาคเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นและมีความเป็นเนื้อเดียวกันของชิ้นงานที่เพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งค่าความแข็งแบบจุลภาคและ Equivalent strain มีความสัมพันธ์กันตามสมการ Equivalent Von Mises strain คือเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น จะมี Equivalent strain และค่าความแข็งระดับจุลภาคที่เพิ่มมากขึ้น รวมทั้งวัสดุจะมีความเป็นเนื้อเดียวกัน และจากผลการทดสอบทางเคมีไฟฟ้าและกราฟโพลาริเซชันแสดงให้เห็นว่าความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานก่อนกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน นั้นมีค่าน้อยที่สุด ส่วนชิ้นงานหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน นั้นมีความต้านทานการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบที่มากขึ้น ด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากการทำให้เกรนละเอียด (Grain refinement) ของชิ้นงานหลังกระบวนการไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน

โลหะผสมไทเทเนียมอัลลอยด์ Ti-6Al-4V ELI เมื่อถูกนำไปขึ้นรูปโดยกระบวนการเสียรูปอย่างรุนแรงด้วยเทคนิควิธีไฮเพรสเซอร์ทอร์ชัน (High Pressure Torsion, HPT) ที่จำนวนรอบการหมุนที่ต่างกัน แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของขนาดเกรนในโครงสร้างระดับจุลภาคที่ต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของวัสดุ ที่จำนวนรอบการหมุนเพิ่มขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงระดับจุลภาคและความต้านทานการกัดกร่อนของวัสดุเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญของวัสดุทางการแพทย์ จึงสรุปได้ว่าวิธีไฮเพรสเซอร์ทอร์ชันนั้นมีศักยภาพในการพัฒนาสมบัติของวัสดุ เนื่องจากการให้แรงกับวัสดุส่งผลให้วัสดุเกิดการเสียรูป จึงเกิดความเครียดที่กระทำกับโครงสร้างภายในของวัสดุ ส่งผลให้โครงสร้างภายใน เกิดการเพิ่มขึ้นของดิสโลเคชัน (dislocation) และสะสม (pile up) ภายในเกรน จนกระทั่งก่อตัวเป็นขอบเกรนรองซึ่งเป็นขอบเกรนที่มีความหนาน้อย และเกิดเป็นขอบเกรนใหม่ขึ้นมา ซึ่งมีขนาดที่เล็กลง ทำให้เกรนมีความละเอียดมากขึ้น ส่งผลให้สมบัติของวัสดุดีขึ้น อีกทั้งยังสามารถใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์ในการทำนายความเค้นที่จะเกิดขึ้นกับชิ้นงาน เพื่อใช้ในการออกแบบการผลิตได้

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นสำหรับ Ti-6Al-4V ELI Alloy ซึ่งเป็นทางเลือกสำหรับผู้ที่ต้องการพัฒนาสมบัติของวัสดุ โดยสามารถนำแบบจำลองและวิธีการทดสอบสมบัติของวัสดุนี้ไปปรับใช้กับวัสดุอื่น ๆ ที่ต้องการได้ เพื่อให้ได้วัสดุที่มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานทางชีวการแพทย์นั้น ๆ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาต่อไป คือ การศึกษาสมบัติของวัสดุเพิ่มเติมในด้านอื่น เช่น การทดสอบทางชีวการแพทย์ โดยการทดสอบความเข้ากันได้ของวัสดุกับเนื้อเยื่อของมนุษย์ การทดสอบโครงสร้างจุลภาคเทคนิคอื่น ๆ ที่ทำให้สามารถเห็นโครงสร้างของเกรนที่ละเอียดมากขึ้น เช่น เทคนิคอิเล็กตรอนแบบทรานสมิชัน (Transmission Electron Microscope, TEM) หรือ เทคนิคอิเล็กตรอนแบบคสแกตเตอร์ดิฟแฟรกชัน (Electron Backscatter Diffraction, EBSD) เพื่อศึกษาหาข้อดีและข้อเสียของวัสดุเพิ่มเติม และในส่วนของ การจำลองทางคอมพิวเตอร์ ศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของ การปรับปรุงเอลิเมนต์ที่เกิดการบิดเบี้ยว เพื่อให้การจำลองสามารถดำเนินการต่อไปได้ในจำนวนที่เพิ่มมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. Hall, E., *The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results*. Proceedings of the Physical Society. Section B, 1951. 64(9): p. 747.
2. Vinogradov, A. and Y. Estrin, *Analytical and numerical approaches to modelling severe plastic deformation*. Progress in Materials Science, 2018. 95: p. 172-242.
3. Valiev, R., *Nanostructuring of metals by severe plastic deformation for advanced properties*. Nature materials, 2004. 3(8): p. 511-516.
4. Zhu, Y.T. and T.G. Langdon, *The fundamentals of nanostructured materials processed by severe plastic deformation*. Jom, 2004. 56(10): p. 58-63.
5. Wongsangam, J., et al., *Numerical Investigation of Plastic Strain Homogeneity during Equal-Channel Angular Pressing of a Cu-Zr Alloy*. Crystals, 2021. 11(12): p. 1505.
6. Valiev, R.Z., et al., *Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation*. Jom, 2006. 58(4): p. 33-39.
7. Pereira, P., et al. *Using finite element modelling to examine the flow process and temperature evolution in HPT under different constraining conditions*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2014. IOP Publishing.
8. Xu, C., Z. Horita, and T.G. Langdon, *Evaluating the influence of pressure and torsional strain on processing by high-pressure torsion*. Journal of materials science, 2008. 43(23): p. 7286-7292.
9. Zhilyaev, A.P. and T.G. Langdon, *Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications*. Progress in Materials science, 2008. 53(6): p. 893-979.
10. England, G. *Hardness testing*. 2007 [cited 2021 19/11]; Available from: <https://www.gordonengland.co.uk/hardness/>
11. ลามอ, ว. ความแข็ง. 2007 [cited 2021 19/11]; Available from: https://www.dss.go.th/images/st-article/pep_5_2550_hardness.pdf.
12. Society, T.E. *Corrosion and Corrosion Prevention*. 2021 [cited 2021 9/11].
13. Krystal Nanan, C. *The 8 most common forms of corrosion*. 2018 [cited 2021 9/11]; Available from: <https://www.corrosionpedia.com/the-8-most-common-forms-of-metal-corrosion/2/1680>.

14. ดี, ณ.ญ.ฐ.พ.พ.น.ช.ต.ร.บ., พฤติกรรมการกัดกร่อนและความเข้ากันได้ทางชีวภาพของชั้นเคลือบคาร์บอนคล้ายเพชรบนเหล็กกล้าไร้สนิม 316L สำหรับวัสดุข้อเข้าเทียม.
15. G3-89, A., *Standard practice for conventions applicable to electrochemical measurements in corrosion testing*. Annual Book of ASTM Standards, 2010.
16. Astm, G., *Standard practice for calculation of corrosion rates and related information from electrochemical measurements*. G102-89, 2004.
17. Katherine Acord, E.L. *Electrochemical Impedance Spectroscopy*. 2021 [cited 2021 9/11]; Available from: <https://eng.libretexts.org/Bookshelves/>
18. Michael Pfeifer, C. *Open circuit potential (OCP)*. 2022 [cited 2021 10/11]; Available from: <https://www.corrosionpedia.com/definition/834/open-circuit-potential-ocp>.
19. Peroff, A. *Open circuit potential (OCP)*. 2021 [cited 2021 10/11]; Available from: <https://pineresearch.com/shop/kb/software/methods-and-techniques/basic-methods/open-circuit-potential-ocp/>.
20. Nie, M., et al., *The corrosion behaviour of commercial purity titanium processed by high-pressure torsion*. Journal of Materials Science, 2014. 49(7): p. 2824-2831.
21. David G Nos, S.a. *The potentiodynamic polarization scan*. 1997 [cited 2021 10/11]; Available from: <file:///E:/Project2021/Corrosion%20Ref/technical-report-33-enos-potentiodynamic-scan.pdf>.
22. จันทรอัมพร, ส., หลักการพื้นฐานของการกัดกร่อน(*Foundations of Corrosion*). 2013.
23. Eastsun Titanium Co., L. การประยุกต์ไทเทเนียมใช้ทางการแพทย์. 2017 [cited 2021 11/11]; Available from: <http://th.tirods.com/news/titanium-is-increasing-develop-in-the-medical--5250285.html>.
24. กาญจนเมฆานันต์, ก. ไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียม. 2020 [cited 2021 11/11]; Available from: https://www.jdat.org/data/upload/2020RV1002_1.pdf.
25. Titanium, P. *Titanium Alloy Grade 23*. 2022 [cited 11/11 2021]; Available from: https://www.titanium.co.th/material/grade_23.html.
26. Bocchetta, P., et al., *Passive layers and corrosion resistance of biomedical Ti-6Al-4V and β -Ti alloys*. Coatings, 2021. 11(5): p. 487.

27. สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. วัสดุทางการแพทย์. 2017 [cited 2021 11/11]; Available from: <https://www.saranukromthai.or.th/sub/book/book.php?book=30&chap=9&page=chap9.htm>
28. Bathe, K.-J., *Finite Element Procedures*. 2 ed. 2014.
29. Systèmes, D., *SIMULIA, Getting started with Abaqus*. Interactive ed. 2008.
30. Valiev, R.Z., *Paradoxes of severe plastic deformation*. *Advanced Engineering Materials*, 2003. 5(5): p. 296-300.
31. Wei, P., et al., *Finite element analysis of high pressure torsion*. *steel research international*, 2013. 84(12): p. 1246-1251.
32. Khiavi, S.G. and E. Emadoddin, *Microhardness distribution and finite element method analysis of Al 5452 alloy processed by unconstrained high pressure torsion*. *Journal of materials research and technology*, 2018. 7(4): p. 410-418.
33. Wang, X., et al., *Microhardness and corrosion properties of hypoeutectic Al-7Si alloy processed by high-pressure torsion*. *Materials & Design*, 2015. 83: p. 193-202.
34. Torbati-Sarraf, H., et al., *Electrochemical behavior of a magnesium ZK60 alloy processed by high-pressure torsion*. *Corrosion Science*, 2019. 154: p. 90-100.
35. Gradt, T., et al., *Friction coefficient between the Ti6Al4V loading pole and the 316LN steel shims of the HL-LHC 11 T magnets*. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018. 28(3): p. 1-3.
36. Adamus, J., et al. *Investigation of sheet-titanium drawability*. in *Proceedings of the 12th World Conference on Titanium Ti*. 2011.
37. Pereira, P.H.R. and R.B. Figueiredo, *Finite element modelling of high-pressure torsion: An overview*. *Materials transactions*, 2019. 60(7): p. 1139-1150.
38. Wang, Y.C. and T.G. Langdon, *Effect of heat treatment on microstructure and microhardness evolution in a Ti-6Al-4V alloy processed by high-pressure torsion*. *Journal of Materials Science*, 2013. 48(13): p. 4646-4652.
39. Lage, M.D.A., et al., *Corrosion behavior of Al-3Mg-0.2 Sc alloy processed by high-pressure torsion and thermal treated*. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022. 18: p. 2745-2753.